



การสังเคราะห์ฟองน้ำเซลลูโลสจากฟางข้าว



ชิวานันท์ นามวัง

การค้นคว้าอิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



SYNTHESIS OF CELLULOSE SPONGE FROM RICE STRAW

CHEEWANAN NAMWANG

AN INDEPENDENT STUDY SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING

MAJOR IN ENVIRONMENTAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

UBON RATCHATHANI UNIVERSITY

ACADEMIC YEAR 2016

COPYRIGHT OF UBON RATCHATHANI UNIVERSITY



ใบรับรองการค้นคว้าอิสระ
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์

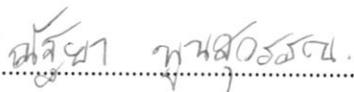
เรื่อง การสังเคราะห์ฟองน้ำเซลลูโลสจากฟางข้าว

ผู้วิจัย นางสาวชิวานันท์ นามวัง

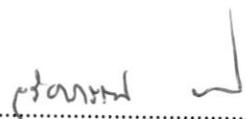
คณะกรรมการสอบ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย กันยาวุธ	ประธานกรรมการ
ดร.ณัฐยา พูนสุวรรณ	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมภพ สมองราษฎร์	กรรมการ

อาจารย์ที่ปรึกษา


.....
(ดร.ณัฐยา พูนสุวรรณ)


.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง)
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์


.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.อริยาภรณ์ พงษ์รัตน์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปีการศึกษา 2559

กิตติกรรมประกาศ

การค้นคว้าอิสระฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยความกรุณา และความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณท่าน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปาณิสสา จางศิริกุล และ ดร.ณัฐยา พูนสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาการค้นคว้าอิสระ ท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมภพ สอนงราชภูมิ และท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย กัญยาวัช กรรมการที่ปรึกษาการค้นคว้าอิสระ ที่ให้คำปรึกษา และคำแนะนำในการศึกษาค้นคว้าข้อมูล ตลอดจนการแก้ปัญหา และการนำเสนอผลการศึกษาให้ครอบคลุมวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีทุกท่านที่ถ่ายทอดวิชาความรู้ให้ความช่วยเหลืออบรมสั่งสอน และนักศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่ให้กำลังใจ ความช่วยเหลือและข้อเสนอแนะต่าง ๆ ในการค้นคว้าอิสระครั้งนี้ด้วย ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทุกท่าน ที่ให้ความกรุณาช่วยเหลือ สนับสนุน และอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานศึกษาจนกระทั่งการค้นคว้าอิสระนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ได้ให้ชีวิต ความรักความห่วงใย คอยให้คำสั่งสอนอบรม และคอยสนับสนุนในทุก ๆ ด้าน จนทำให้สำเร็จการศึกษาไปได้ด้วยดี

ชิวานันท์ นามวัง

ผู้วิจัย

บทคัดย่อ

เรื่อง : การสังเคราะห์ฟองน้ำเซลลูโลสจากฟางข้าว
ผู้วิจัย : ชีวานันท์ นามวัง
ชื่อปริญญา : วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา : วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา: ดร.ณัฐยา พุนสุวรรณ
คำสำคัญ : ฟางข้าว, ฟองน้ำเซลลูโลส, ของเหลวหนืด, คาร์บอนไดออกไซด์,
โซเดียมไฮดรอกไซด์

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ศึกษาปัจจัยของขนาดอนุภาคเฉลี่ย ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ และเวลาบ่มหลังเติมคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีผล ต่อสมบัติของฟองน้ำเซลลูโลสจากฟางข้าว จากผลการศึกษาพบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของฟางข้าว ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ และเวลาบ่มหลังเติมคาร์บอนไดออกไซด์ ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความหนาแน่น และความสามารถการดูดซึมของเหลวของฟองน้ำเซลลูโลส โดยสภาวะที่เหมาะสมต่อการเตรียมฟองน้ำเซลลูโลสด้วยฟางข้าว คือ ฟางข้าวที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ย $297 \mu\text{m}$ แขนในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10%wt เติมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ ปริมาตร 20 ml. และใช้เวลาบ่มหลังเติมคาร์บอนไดออกไซด์ 60 นาที ซึ่งทำให้ได้ฟองน้ำเซลลูโลสที่มีความสามารถในการการดูดซึมน้ำ และน้ำมันพืช เท่ากับ 4.03 และ 1.73 เท่าของน้ำหนักแห้งตามลำดับ นอกจากนี้ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าที่ขนาดอนุภาคเล็กกว่า $149 \mu\text{m}$ และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์มากกว่า 34%wt ไม่สามารถขึ้นรูปได้

ABSTRACT

TITLE : SYNTHESIS OF CELLULOSE SPONGE FROM RICE STRAW
AUTHOR : CHEEWANAN NAMWANG
DEGREE : MASTER OF ENGINEERING
MAJOR : ENVIRONMENTAL ENGINEERING
ADVISOR : NATTHAYA PUNSUWAN, Ph.D.
KEYWORDS : RICE STRAW, CELLULOSE SPONGE, VISCOSE, CARBON DISULPHIDE,
SODIUM HYDROXIDE.

This study investigated the effect of average particle size of rice straw, sodium hydroxide, carbon disulfide, and curing period on the properties of cellulose sponge obtained from rice straw. The experiments were performed by soak rice straw in NaOH solution for separated pulp, then added CS₂ and NaOH solution and mix well before curing this viscose solution in temperature 10±2 °C for 24 hours, after that formed sponge from this viscose solution by using Na₂SO₄ and H₂SO. The results show that the average particle size of rice straw, the concentration of sodium hydroxide solution, the amount of carbon disulfide and curing time period has a significant affects on density and liquid absorption capacity of cellulose sponge. The optimum conditions for preparation of cellulose sponge from rice straw were as follows: rice straw average particle size of 297 μm, impregnated in 10%wt NaOH solution, adding 20 ml. concentrate CS₂, and 60 min curing period. The adsorption capacity of water and oil were 4.03 and 1.73 times of dry weight of the cellulose sponge, respectively. Moreover, the results found that the cellulose sponge made form rice straw could not form a matrix structure at the small particle size of rice straw (<149 μm) and high concentration of sodium hydroxide (>34%wt).

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ	ซ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ชีวมวล	4
2.2 ส่วนประกอบเส้นใยวัสดุธรรมชาติ	6
2.3 ฟองน้ำเซลลูโลสสังเคราะห์	11
2.4 การดูดซึม (Absorption)	13
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์	14
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย	14
3.3 วัสดุดิบที่ใช้	14
3.4 วิธีการทดลอง	16
3.5 การวิเคราะห์สมบัติของเหลวหนืดและสมบัติของฟองน้ำเซลลูโลส	18
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและอภิปรายผล	
4.1 ปัจจัยของอนุภาคต่อค่าความหนืดของของเหลวหนืดและสมบัติของฟองน้ำเซลลูโลส	20
4.2 ปัจจัยของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อค่าความหนืดของของเหลวหนืด และสมบัติของฟองน้ำ	22
4.3 ปัจจัยของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ต่อค่าความหนืดของของเหลวหนืด และสมบัติของฟองน้ำ	23
4.4 ปัจจัยของเวลาบ่มหลังเติมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อค่าความหนืดของของเหลวหนืด และสมบัติของฟองน้ำ	25

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	27
เอกสารอ้างอิง	28
ประวัติผู้วิจัย	31

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	การใช้ประโยชน์ที่ดินทางการเกษตรในประเทศ พ.ศ.2557	5
2.2	องค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าว	5
4.1	ค่าความหนืดของของเหลวหนืด การขึ้นรูปและคุณสมบัติของฟองน้ำเซลลูโลส ที่เตรียมจากฟางข้าวที่เตรียมจากฟางข้าวขนาดอนุภาคต่าง ๆ	21
4.2	ค่าความหนืดของของเหลวหนืด การขึ้นรูปและคุณสมบัติของฟองน้ำเซลลูโลส จากฟางข้าวที่เตรียมจากความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	22
4.3	ค่าความหนืดของของเหลวหนืด การขึ้นรูปและคุณสมบัติของฟองน้ำเซลลูโลสจากฟางข้าว ที่เตรียมจากคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปริมาณของต่าง ๆ	24
4.4	ค่าความหนืดของของเหลวหนืด การขึ้นรูปและคุณสมบัติของฟองน้ำเซลลูโลส ที่เตรียมจากเวลาบ่มหลังเติมคาร์บอนไดออกไซด์ต่าง ๆ	26

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	โครงสร้างภายในของเซลล์โลส 6
2.2	โครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลเซลล์โลส 7
2.3	โครงสร้างของเฮมิเซลล์โลส 9
2.4	โครงสร้างของลิกนิน 10
2.5	กระบวนการดูดซึม 13
3.1	ขั้นตอนการเตรียมฟองน้ำเซลล์โลสจากชีวมวล 15
3.2	ตัวอย่างชิ้นงานฟองน้ำเซลล์โลสจากฟางข้าวที่นำมาวิเคราะห์ 18
3.3	ความสามารถในการดูดซับของเหลวเทียบกับเวลา 19
4.1	พื้นที่ผิวฟองน้ำเซลล์โลสที่เตรียมจากสภาวะฟางข้าวขนาด (ก) 297 μm และ (ข) 210 μm 21
4.2	พื้นที่ผิวฟองน้ำเซลล์โลสจากฟางข้าวที่เตรียมจากสารละลายของ โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น (ก) 10%wt และ (ข) 2 %wt 23
4.3	พื้นที่ผิวฟองน้ำเซลล์โลสที่เตรียมจากสภาวะคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปริมาณ (ก) 20 มิลลิลิตร และ (ข) 5 มิลลิลิตร 25
4.4	พื้นที่ผิวฟองน้ำเซลล์โลสที่เตรียมจากสภาวะเวลาบ่มหลังเติมคาร์บอนไดออกไซด์ที่ ปริมาณ (ก) 60 นาที และ (ข) 30 นาที 26

คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ

สัญลักษณ์	คำอธิบาย
%DM	ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง
DP	องศาความเป็นพอลิเมอร์
μm	ไมครอน
%wt	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ml	มิลลิลิตร

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยมีประชากรกว่า 10,820,000 คน ประกอบอาชีพในภาคการเกษตร(สำนักงานสถิติแห่งชาติ) ถึงแม้ว่าปัจจุบันรายได้ของประเทศมาจากการอุตสาหกรรม การท่องเที่ยว แต่อย่างไรก็ตามอาชีพทางการเกษตรก็ยังเป็นรายได้หลักของประเทศ ซึ่งมีผลผลิตทางการเกษตรมากมายหลากหลายชนิดทั้งที่มีการแปรรูปแล้วส่งออก หรือส่งออกไปแปรรูปนับหลายล้านตันต่อปี ภายหลังจากการเก็บเกี่ยวสิ่งที่ตามมาคือ วัสดุเหลือใช้จากการเกษตรที่เกิดขึ้นจะมีจำนวนมากตามไปด้วย ซึ่งในปัจจุบันกระบวนการจัดการวัสดุเหลือใช้ดังกล่าว ไม่ว่าจะเป็นการเผาทำลายเพื่อเตรียมหน้าดิน หรือเผาทิ้งเพื่อลดปัญหาพื้นที่จัดเก็บ ล้วนก่อให้เกิดเป็นปัญหามลภาวะซึ่งสร้างมลพิษให้กับสิ่งแวดล้อมกว่า 147.353 ตันต่อปี (กิตติยาภรณ์ รองเมือง, 2558) วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ถูกเรียกรวมกันว่า วัสดุชีวมวล ซึ่งเป็นวัสดุที่เหลือจากการเกษตร และการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร และด้วยวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเหล่านี้ เป็นผลิตผลจากพืช ตามธรรมชาติโครงสร้างของพืชนั้นจะมีผนังเซลล์ซึ่งมีส่วนประกอบหลักเป็นเซลลูโลส จึงสามารถนำไปต่อยอดเป็นวัตถุดิบใช้งานได้หลากหลาย โดยวัสดุที่ใช้ดูดซับและดูดซึมจากเซลลูโลสมีความสามารถในการกักเก็บของเหลวอยู่หลายชนิด เช่น กระดาษชำระ แผ่นฟิล์มซับน้ำมัน เป็นต้น ด้วยลักษณะโครงสร้างที่เหนียวแน่นถักทอกันของเซลลูโลสมีผลต่อความสามารถในการโอบอุ้มของเหลวไว้ภายในโครงสร้างได้ดี จากความสามารถของเซลลูโลสที่ถูกขึ้นรูปให้เหมาะกับการใช้งานซึ่งมีลักษณะที่แตกต่างกันไป ทั้งที่เป็นผลึก เป็นแผ่นฟิล์ม และเป็นฟองน้ำ

ปัญหาน้ำมันรั่วไหลในแหล่งน้ำธรรมชาติของบริษัท การปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย จำกัด (มหาชน) ที่เกิดขึ้นจากอุบัติเหตุขณะขนถ่ายน้ำมันทางทะเล ทำให้มีน้ำมันรั่วไหลลงสู่ทะเลบริเวณอ่าวพร้าว เกาะเสม็ด เกิดเป็นปัญหาทางสิ่งแวดล้อมที่ไม่สามารถฟื้นฟูระบบนิเวศน์ให้กลับมาเหมือนเดิมในระยะอันสั้นได้ ซึ่งนับว่าเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่ควรได้รับความสำคัญในการแก้ปัญหาอย่างเร่งด่วน จึงได้มีการนำสารเคมีเข้ามาช่วยกำจัดน้ำมัน แม้ว่าวิธีการดังกล่าวจะมีความสามารถการกำจัดสูง แต่ก็ก่อให้เกิดปัญหาการสะสมของสารเคมีในทะเล ดังนั้นการนำเศษวัสดุทางการเกษตรที่เหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ดังเช่น ฟางข้าว ซึ่งมีส่วนประกอบหลักเป็นเส้นใยธรรมชาติที่สำคัญและเนื่องมาจากในผลผลิตข้าว 1 ตันจะมีปริมาณชีวมวลในส่วนของฟางข้าวมากถึง 490 กิโลกรัม (กระทรวงพลังงาน) ทำให้มีปริมาณมาก หาได้ง่าย และมีมูลค่าต่ำ โดยนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเหล่านั้นมาใช้เป็นวัตถุดิบในการเตรียมเป็นฟองน้ำเซลลูโลสสังเคราะห์ และใช้เป็นวัสดุช่วยในการดูดซับน้ำมันที่สามารถใช้ซ้ำได้หลายครั้ง (Edward. B, 2017) ทั้งยังเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่ม และอาจช่วยลดปริมาณขยะจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรได้อีกด้วย

ฟองน้ำเซลลูโลส เป็นการขึ้นรูปเซลลูโลสอีกแบบหนึ่งที่มีสมบัติคล้ายฟองน้ำในธรรมชาติ ความสามารถในการดูดซับของเหลวของฟองน้ำเซลลูโลสนั้นถูกใช้ประโยชน์ในการดูดซับสารได้หลายชนิด เช่น น้ำ น้ำมันดิบ น้ำมันจากอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง เป็นต้น (ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์ และคณะ, 2549) รวมทั้งสร้างตัวดูดซับให้มีความจำเพาะเจาะจงได้ตามคุณสมบัติพิเศษของวัสดุ เช่น การสังเคราะห์วัสดุดูดซับไขมันจากเปลือกต้นสูกซึ่งมีคุณสมบัติไฮโดรโฟบิก (Masaki และคณะ, 2003) เมื่อหมดอายุการใช้งานแล้วยังสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือย่อยสลายเองตามธรรมชาติ เนื่องจากไม่ได้มีโครงสร้างหลักเป็นโพลีเมอร์สังเคราะห์ นฤมล ศรีวิฑูรย์ (2548) ได้ศึกษาการผลิตฟองน้ำเส้นใยธรรมชาติจากขานอ้อยเพื่อเป็นวัสดุดูดซับน้ำมันปนเปื้อนในทะเล พบว่า ฟองน้ำเซลลูโลสที่เตรียมได้ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 18 โดยน้ำหนัก ผสมกับเกลือโซเดียมซัลเฟตในอัตราส่วนร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ด้วยปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ 25 ml และเตรียมที่สภาวะอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ทำให้ได้ฟองน้ำที่มีความสามารถในการดูดซับน้ำมันดิบสูงถึง 12 เท่าของน้ำหนักแห้ง เมื่อเทียบกับความสามารถในการดูดซับน้ำมันดิบของพอลิพรอพิลีนซึ่งเป็นวัสดุทางการค้า พบว่า ฟองน้ำเส้นใยธรรมชาติจากขานอ้อยที่เตรียมด้วยสภาวะข้างต้นจะมีความสามารถในการดูดซับน้ำมันดิบได้สูงถึง 1.25 เท่าของความสามารถในการดูดซับน้ำมันดิบของพอลิพรอพิลีน นอกจากนี้ ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์ และคณะ (2549) ศึกษาการผลิตฟองน้ำเซลลูโลสจากฟางข้าว โดยทำการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับของฟองน้ำเซลลูโลสที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับไขมันในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง และพบว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อการเตรียมฟองน้ำเซลลูโลสจากฟางข้าวคือ สภาวะ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 18 โดยน้ำหนัก คาร์บอนไดออกไซด์ 45 ml และอัตราส่วนระหว่างสารละลายหนักกับโซเดียมซัลเฟตเท่ากับ 1:2 จะทำให้ได้ฟองน้ำเซลลูโลส จากฟางข้าวที่สามารถดูดซับไขมันได้สูงถึง 14.79 กรัม ต่อหนึ่งกรัมของน้ำหนักแห้ง ซึ่งสูงเป็น 2 เท่า ของฟองน้ำทั่วไป จากข้อมูลในเบื้องต้นดังกล่าวแล้ว ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะนำเอาเส้นใยธรรมชาติจากฟางข้าว ซึ่งเป็น “ชีวมวล” มาขึ้นรูปเป็นฟองน้ำเซลลูโลส โดยใช้เป็นตัวดูดซับน้ำมันที่ปนเปื้อนในธรรมชาติ โดยทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของฟองน้ำเซลลูโลส ได้แก่ ขนาดอนุภาค ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ และเวลาในการบ่มหลังเติมคาร์บอนไดออกไซด์ โดยวิเคราะห์ผ่านความหนืด ความหนาแน่น ความสามารถในการดูดซับน้ำ และน้ำมัน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษา และวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของฟองน้ำเซลลูโลสจากฟางข้าว

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 วัสดุชีวมวลที่ใช้ในงานวิจัย

ฟางข้าวนาปี พ.ศ. 2560 ที่มีอายุหลังเก็บเกี่ยวไม่เกินสามเดือน จาก อำเภอนาสว่าง จังหวัดอุบลราชธานี

1.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของฟองน้ำเซลลูโลสที่ทำการศึกษา

1.3.1.1 ฟางข้าวขนาดอนุภาค 595 297 210 149 และน้อยกว่า 74 μm

1.3.1.2 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 2 10 18 26 และ 34%wt

1.3.1.3 ปริมาณของคาร์บอนไดซัลไฟด์ (CS₂) 5 10 20 และ 40 ml

1.3.1.4 เวลาที่ใช้ ในการบ่มหลังเติมคาร์บอนไดซัลไฟด์ (CS₂) 30 60 120 และ 240 นาที

1.3.3 การศึกษาสมบัติของฟองน้ำเซลลูโลสและสมบัติของของเหลวหนืดโดย

1.3.2.1 วิเคราะห์ค่าความหนืดของของเหลวหนืดก่อนขึ้นรูปฟองน้ำเซลลูโลส ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืด HAAKE รุ่น Viscotester 6 plus

1.3.2.2 วิเคราะห์ความหนาแน่นของฟองน้ำเซลลูโลส ด้วยวิธีมาตรฐาน ASTM D3574 – 95

1.3.2.3 วิเคราะห์ความสามารถในการกักเก็บของเหลวของฟองน้ำเซลลูโลส ด้วยการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D570

1.3.2.4 วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟองน้ำเซลลูโลสที่เตรียมได้ด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปฟองน้ำเซลลูโลส

1.4.2 สามารถเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

1.4.3 สามารถลดปัญหามลพิษลงได้

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ชีวมวล

ชีวมวล (biomass) คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ เช่น เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือกากจากระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมเกษตร เช่น แกลบได้จากการสีข้าว ชานอ้อยได้จากการผลิตน้ำตาลทราย เศษไม้ ได้จากการแปรรูปไม้ยางพาราหรือไม้ยูคาลิปตัสเป็นส่วนใหญ่ และบางส่วนได้จากสวนป่าที่ปลูกไว้ กากปาล์ม ได้จากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบออกจากผลปาล์มสด กากมันสำปะหลังได้จากการผลิตแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งข้าวโพด ได้จากการสีข้าวโพดเพื่อนำเมล็ดออก กาบและกะลามะพร้าว ได้จากการนำมะพร้าวมาปอกเปลือกออกเพื่อนำเนื้อมะพร้าวไปผลิตกะทิ และน้ำมันมะพร้าว สำเหล้า ได้จากการผลิตแอลกอฮอล์ เป็นต้น ชีวมวล สามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้ เพราะในขั้นตอนของการเจริญเติบโตนั้น พืชใช้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ แล้วเปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์โดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสง ได้ออกมา เป็นแป้งและน้ำตาล แล้วกักเก็บไว้ตามส่วนต่าง ๆ ของพืช ดังนั้น เมื่อนำพืชมาเป็นเชื้อเพลิง เราก็จะได้พลังงานออกมา โดยเนื้อที่เพาะปลูก และผลผลิตพืชเศรษฐกิจ ของประเทศไทยสามารถดูได้จากตารางที่ 2.1 จะเห็นว่า มีพื้นที่ของการปลูกข้าว ไม้ยางพารา และอ้อย ข้าวโพด และมันสำปะหลังอยู่ในห้าอันดับแรกของผลผลิตที่เกิดขึ้น

ฟางข้าว คือวัสดุเหลือทิ้งจากการทำนาข้าวที่ได้หลังจากการเก็บเกี่ยวผลผลิต เกษตรกรมักกำจัดด้วยการเผาทำลายในการเตรียมหน้าดินให้ว่างสำหรับการเพาะปลูกครั้งต่อไป ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะทางอากาศ คิดเป็นปริมาณฝุ่นรวมกว่า 147.353 ตันต่อปี จึงมีการพัฒนาการนำฟางข้าวไปใช้ประโยชน์กันอย่างกว้างขวางในด้านต่างๆ ทำให้มีข้อมูลในการวิจัยในทุกๆด้านออกอย่างต่อเนื่อง และด้วยประเทศไทยมีการส่งออกข้าวเป็นส่วนใหญ่ และมีการทำนาปีละ 2-3 ครั้ง ทำให้มีฟางข้าวจากการทำนาในปริมาณมากตามมา ในฟางข้าวชนิดต่าง ๆ มีส่วนประกอบ หลักคือ เซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และ ลิกนิน (lignin) แต่มีปริมาณแตกต่างกันตามชนิดของข้าว ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 การใช้ประโยชน์ที่ดินทางการเกษตรในประเทศ พ.ศ.2557

รายการ	ทั่วประเทศ (ล้านไร่)	ภาคเหนือ (ล้านไร่)	ภาค ตะวันออกเฉียงเหนือ (ล้านไร่)	ภาคกลาง (ล้านไร่)	ภาคใต้ (ล้านไร่)
เนื้อที่ใช้ประโยชน์ ทางการเกษตร	149.23	32.49	63.84	31.12	21.77
นาข้าว	69.96	15.79	42.75	10.20	1.22
พืชไร่	31.15	10.19	11.94	9.01	0.01
สวนไม้ผล	34.92	4.05	4.32	7.39	19.16
สวนผัก ไม้ดอก ไม้ประดับ	1.40	0.45	0.32	0.50	0.13
เนื้อที่ใช้ประโยชน์ ทางการเกษตรอื่นๆ	11.80	2.01	4.52	4.02	1.2

ที่มา: สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2559)

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าว

ชนิดฟางข้าว	ร้อยละของน้ำหนักแห้ง		
	เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน
ข้าวบาร์เลย์	40.7	23.8	8.0
ข้าว	39.6	34.3	6.3
ข้าวฟ่าง	42.2	31.6	7.6
ข้าวสาลี	43.2	22.4	9.5

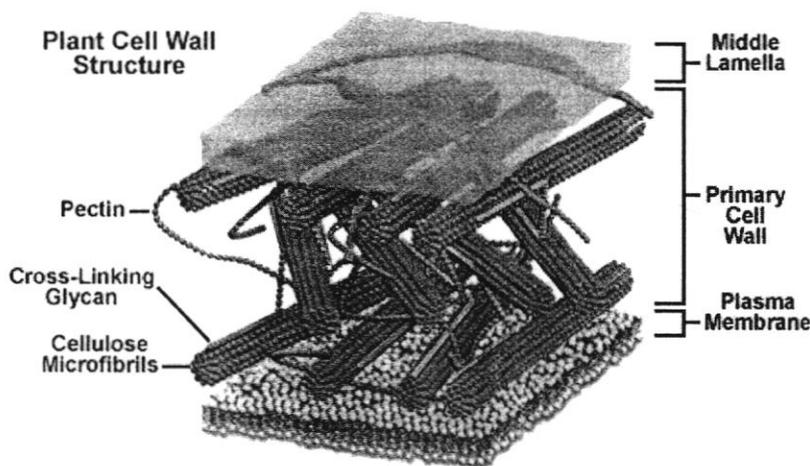
ที่มา: ระวีวรรณ แก้วกล้า (2538)

2.2 ส่วนประกอบเส้นใยในวัสดุธรรมชาติ

2.2.1 เซลลูโลส (Cellulose)

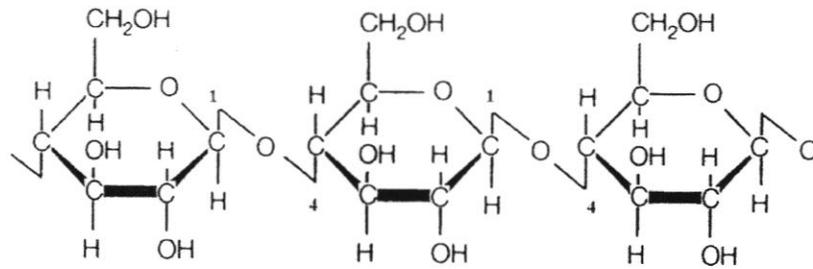
เซลลูโลสเป็นโพลิเมอร์ที่มีมากที่สุดในโลก และพบโดยทั่วไปในธรรมชาติ เนื่องจาก เป็นองค์ประกอบหลักของผนังเซลล์พืชทุกชนิด โดยมีโครงสร้างผนังเซลล์ตามรูป 2.1 ปริมาณเซลลูโลสในพืชต่างชนิดกันจะไม่เท่ากัน นอกเหนือจากเซลลูโลส จะพบองค์ประกอบของลิกนิน และสารประกอบอื่นๆ ในโครงสร้าง พืชเส้นใยธรรมชาติจากพืชทุกชนิดจัดเป็นเส้นใยเซลลูโลส (cellulose fiber) ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วยธาตุหลัก คือ คาร์บอน ร้อยละ 44.4 ไฮโดรเจน ร้อยละ 6.2 และออกซิเจนร้อยละ 49.4 ไม่เคยพบว่ามีเซลลูโลสบริสุทธิ์ในธรรมชาติ โดยทั่วไป มักจะพบการปนด้วยสารประเภทลิกนิน (lignin) เพคติน(pectin) หรือขี้ผึ้ง (wax) เสมอ เซลลูโลสเป็นสารประกอบประมาณ 10,000 หน่วย ต่อกันเป็นโมเลกุลโพลิเมอร์โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลสคือ โพลี-เบต้า-1-

4-ดี-แอนไฮโดรกลูโคไพราโนส (poly (β -1-4-D-anhydroglucopyranose)) ประกอบด้วยหน่วยพื้นฐานซึ่งเรียกว่า แอนไฮโดร-ดี-กลูโคส (Anhydro-d-glucose, $C_6H_{10}O_5$) ซึ่งเกิดจากการกำจัดน้ำออกจากกลูโคสต่อกันเป็นลูกโซ่โมเลกุลยาว ดังแสดงในภาพที่ 2.2 แต่ละหน่วยของกลูโคสประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl, -OH) 3 หมู่ด้วยกัน ซึ่งเหมือนกับโครงสร้างของน้ำตาลทั่วไป แต่เนื่องจากโมเลกุลยาวต่อกันเป็นสายโซ่ทำให้ไม่ละลายน้ำเหมือนน้ำตาล โครงสร้างทางเคมีนับว่ามี การจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของหน่วยที่ซ้ำกันในโมเลกุล เซลลูโลสจึงมีความเป็นผลึกสูงคือ มีลักษณะการเรียงตัวเป็นลูกโซ่โมเลกุลยาว ทำให้มีความแข็งแรงสูงประเภทโพลีแซคคาไรด์ (polysaccharides) ประกอบด้วยกลูโคส (glucose) เป็นหน่วยย่อย ตามไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างจะเป็นตัวดึงดูดน้ำทำให้เซลลูโลสมีความสามารถในการดูดซับความชื้นได้ดีอีกทั้งเป็นจุดที่ทำให้เกิดปฏิกิริยากับกรดอะซิติก (acetic acid) ได้เป็นเซลลูโลสอะซิเตต (cellulose acetate) เนื่องจากเซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลถึง 3 หมู่ จึงเกิดพันธะไฮโดรเจน เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลเซลลูโลส นอกจากนั้นในโครงสร้างบริเวณที่เป็นการต่อกันของธาตุคาร์บอน-ออกซิเจน-คาร์บอน (-C-O-C-) เป็นจุดที่ถูกทำลายได้ด้วยผลจากการเกิดออกซิเดชัน (oxidation) ทำให้สายโซ่ยาวขาดลงเป็นส่วนเล็กๆ คล้ายน้ำตาลสายโซ่โมเลกุลยาวของเซลลูโลสสามารถทำการตรวจวิเคราะห์ได้ด้วย



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างภายในของเซลลูโลส
ที่มา: Michael W. et al. (2015)

พิจารณาจากค่าของน้ำหนักโมเลกุล ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 100,000 จนถึงประมาณ 1 - 2 ล้าน ลินิน ปาน ปอ อาจมีน้ำหนักโมเลกุลสูงถึง 6 ล้าน เส้นใยเรยอนที่เป็นเส้นใยประดิษฐ์มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 20,000 - 230,000 น้ำหนักโมเลกุลมักถูกคำนวณในลักษณะของค่าเฉลี่ยจากหน่วยย่อยที่เป็นกลูโคส แล้วคูณด้วยจำนวนหน่วยย่อยที่ซ้ำกัน สามารถเขียนสูตรทางเคมีทั่วไปของเซลลูโลสได้ เป็น $(C_6H_{10}O_5)_n$ โดย n คือ ค่าระดับขั้นของการเกิดโพลิเมอร์ ค่า n ยิ่งมากน้ำหนักโมเลกุลยิ่งสูง (วีรศักดิ์ อุดมกิจเดชา, 2543)



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลเซลลูโลส

ที่มา: พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนานนท์ (2560)

2.2.1.1 สมบัติของเซลลูโลส

เซลลูโลสนั้นเป็นของแข็งไม่มีสี มีการดูด และคายไอน้ำและของเหลวอื่น ๆ ที่อยู่ในบรรยากาศรอบๆจนกระทั่งถึงสมดุล ซึ่งสมดุลของปริมาณความชื้นของเซลลูโลสจะเปลี่ยนไปตามความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศรอบๆ เซลลูโลสจะเกิดการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) อย่างรวดเร็วในสารละลายกรดแก่ที่อุณหภูมิห้อง สารละลายเกลือบางชนิดที่เข้มข้น เช่น ซิงค์คลอไรด์ (zinc chloride) เข้มข้นร้อยละ 72 และสารละลายอัลคาไลไฮดรอกไซด์ (alkali hydroxide) เช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะทำให้เซลลูโลสบวมตัวและเซลลูโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำๆ ละลายได้ เซลลูโลสไม่ละลายในน้ำและในตัวทำละลายอินทรีย์ แต่จะละลายในกรดแก่เข้มข้น เช่น กรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 72 กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 40 และกรดฟอสฟอริกเข้มข้นร้อยละ 78 ความหนืดเป็นสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของเซลลูโลสและอนุพันธ์ โดยความหนืดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความเข้มข้นของเซลลูโลสมากขึ้น

โดยทั่วไปเมื่อนำเซลลูโลสไปทำปฏิกิริยากับสารเคมีจะเกิดปฏิกิริยาหลายอย่างตามชนิดของสารเคมีที่ใช้ แบ่งเป็น 3 ชนิดด้วยกัน

- 1) ปฏิกิริยาที่ทำให้เซลลูโลสบวมตัวและกระจายตัว โดยไม่ทำให้โซ่เซลลูโลสยาวขึ้น หรือเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีของหมู่เซลลูโลสในเส้นใย
- 2) ปฏิกิริยาที่ทำให้ความยาวของโซ่เซลลูโลสเปลี่ยนแปลงเพราะการเสื่อม
- 3) ปฏิกิริยาที่ทำให้หมู่ไฮดรอกซิลเปลี่ยนเป็นเอสเตอร์ (ester) หรือสารประกอบอื่นอย่างสมบูรณ์

ปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิดไม่ได้เกิดอย่างใดอย่างหนึ่งเพียงอย่างเดียวโดยสมบูรณ์ แต่จะเกิดร่วมกันเสมอ บางครั้งอาจเกิดขึ้นพร้อมกันทั้ง 3 ชนิด (อัจฉราพร ไสละสุต, 2533)

เส้นใยเซลลูโลสทนต่างแต่ไม่ทนกรดเข้มข้น ถ้าสามารถควบคุมปฏิกิริยาของกรดและด่างให้เกิดเอสเทอร์หรือสารประกอบอื่นอย่างสมบูรณ์ สามารถใช้ตกแต่งเส้นใย เส้นใยนี้จะไหม้ได้ง่ายในอากาศโดยไม่มีกลิ่นเหม็น เหลือถ้าเล็กน้อย ถ้าเผาในหลอดทดลองจะมีหยดน้ำเกาะที่ข้าง ๆ หลอด แสดงให้เห็นว่ามีไฮโดรเจน และออกซิเจนเป็นส่วนประกอบ ส่วนคาร์บอนกลายเป็นเถ้า

ถึงแม้เส้นใยเซลลูโลสมีอยู่มากมายหลายชนิด เนื่องจากเส้นใยทุกชนิดมีองค์ประกอบทางเคมีในหน่วยย่อยที่เหมือนกัน ดังนั้นจึงทำให้สมบัติของเส้นใยกลุ่มนี้มีความคล้ายกัน

คือ ดูดซึมความชื้นได้ดี นำความร้อนได้ดี มีความสามารถในการทนต่ออุณหภูมิสูง ความสามารถในการคืนตัวจากแรงอัดต่ำ เส้นใยสามารถเกาะกันแน่นในขณะที่เป็นด้าย เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี ความหนาแน่นสูง ถูกทำลายได้ด้วยรา จุดติดไฟ ทนต่อแมลง และถูกทำลายได้ด้วยกรด จำพวกกรดแร่ (mineral acid)

เส้นใยเซลลูโลสธรรมชาติ เช่น ฝ้าย ลินิน ทนต่อปฏิกิริยาเคมีได้มากกว่าเส้นใยเซลลูโลสอื่นๆ แต่การทิ้งเส้นใยเหล่านี้ไว้ในอากาศเป็นเวลานาน รวมทั้งสารออกซิไดซ์ (oxidizing agent) เป็นผลทำให้เส้นใยเสื่อมสภาพได้ ในธรรมชาติจะพบเส้นใยเซลลูโลสจากส่วนต่าง ๆ ของพืช แตกต่างกันได้หลากหลาย บางประเภทเป็นเส้นใยที่ได้จากเมล็ด เช่น ฝ้าย นุ่น ปอ บางประเภทเป็นเส้นใยที่ได้จากลำต้น เช่น ลินิน ป่าน เส้นใยจากใบ เช่น ใบสับปะรด ป่านศรนารายณ์ หรือแม้กระทั่งเส้นใยจากผล เช่น ใยกาบมะพร้าว

2.2.1.2 การย่อยสลายเซลลูโลส

การย่อยสลายเซลลูโลสทำได้ 2 วิธี คือ วิธีทางเคมี และวิธีทางชีวเคมี

1) การย่อยสลายเซลลูโลสโดยวิธีทางเคมี

การย่อยสลายเซลลูโลสโดยวิธีทางเคมี เป็นการย่อยสลายเซลลูโลสโดยใช้กรดหรือด่าง สำหรับการใช้กรด ปฏิกิริยาการย่อยสลายจะเกิดเป็น 2 ขั้นตอน

1.1) ขั้นแรกเป็นการย่อยสลายเซลลูโลสเป็นน้ำตาล

1.2) ขั้นที่ 2 กรดย่อยสลายน้ำตาลให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์อื่น ซึ่งได้จากการย่อยสลายน้ำตาล (sugar degradation products) เช่น กรดลิวูลินิก (levulinic acid) กับกรดฟอร์มิก (formic acid) ซึ่งเป็นการย่อยสลายน้ำตาลให้เป็นผลิตภัณฑ์อื่น โดยกรดที่นิยมใช้ในการย่อยสลายเซลลูโลส ได้แก่ กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ซึ่งการย่อยสลายจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายในเวลา 15 - 20 นาที

การใช้ด่างในการย่อยสลายเซลลูโลส มีผลทำให้ส่วนที่เป็นโครงร่างผลึก (crystalline) ในเซลลูโลสเกิดการบวมตัว (swelling) และอาจมีน้ำตาลบางส่วนหลุดออกมาจากสายโพลีแซคคาไรด์ เมื่อนำพืชที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยด่าง ไปย่อยสลายต่อโดยใช้เอนไซม์เซลลูเลส (Cellulase Enzyme) จะทำให้เอนไซม์เซลลูเลสเข้าไปย่อยสลายพืชชั้น ๆ ได้มากขึ้น เนื่องจากการปรับปรุงคุณภาพด้วยด่าง ทำให้เกิดการบวมตัวของเซลลูโลสในส่วนที่เป็นโครงร่างผลึก ต่างที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพ ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และแอมโมเนียม (NH_4OH)

2) การย่อยสลายเซลลูโลสโดยวิธีทางชีวเคมี

การย่อยสลายเซลลูโลสโดยวิธีทางชีวเคมี เป็นการย่อยสลายเซลลูโลสโดยใช้เอนไซม์เซลลูเลส มีข้อดีคือ ปฏิกิริยาการย่อยสลายจะเกิดขึ้นช้าๆ และน้ำตาลที่ได้จะไม่ถูกย่อยสลายต่อ

การย่อยสลายเซลลูโลสโดยวิธีทางชีวเคมีทำได้ 2 วิธี

2.1) การย่อยสลายเซลลูโลส โดยเอนไซม์เซลลูเลสที่สกัดจากจุลินทรีย์พวกที่สามารถสร้างเอนไซม์ตัวนี้ได้ ซึ่งส่วนมากจะมีขายกันในทางการค้า และมักมีราคาแพง เช่น Meicelase และ CFP - 233

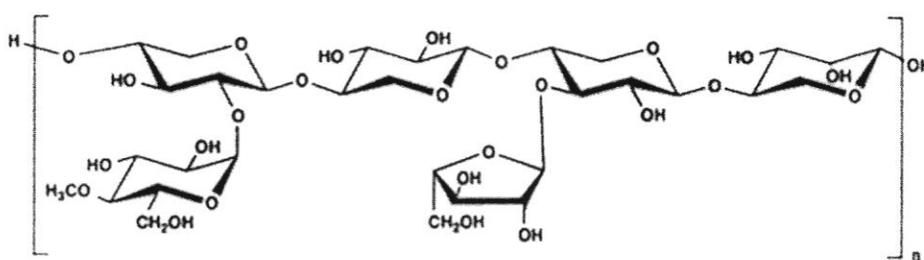
2.2) เป็นการย่อยสลายเซลลูโลสโดยการเลี้ยงจุลินทรีย์ที่สามารถผลิตเอนไซม์เซลลูเลสบนวัสดุที่ต้องการย่อยสลาย วิธีนี้จะสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากกว่าวิธีแรก

2.2.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำ มีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบ ในเฮมิเซลลูโลสมีน้ำตาลหลายชนิด ซึ่งมีไซโลสมากที่สุดถึง 85 - 90% และส่วนที่เหลือเป็นน้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 และ 6 อะตอม กรดแมนนูโรนิก (mannuronic acid) และกรดกาแลคทูโรนิก (galacturonic acid) เป็นองค์ประกอบ เฮมิเซลลูโลสจะถูกย่อยสลายได้ง่ายด้วยกรด หรือต่างเจือจางหรือเอนไซม์ เพราะเฮมิเซลลูโลสไม่มีรูปร่างแน่นอน ไม่เป็นเส้นตรงและมีลำดับของหน่วยน้ำตาลแบบสลับ จึงทำให้พันธะที่เชื่อมระหว่างไซโลสถูกทำลายด้วยกรด หรือเอนไซม์ได้ง่าย

2.2.2.1 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส

พืชประกอบด้วยเฮมิเซลลูโลสประมาณ 1 ใน 3 ของน้ำหนักแห้ง โดยอยู่รวมกับเซลลูโลส และลิกนิน ทำให้เกิดเป็นผนังเซลล์พืชที่แข็งแรง เฮมิเซลลูโลสมีทั้งโครงสร้างที่เป็นสายโซ่ตรง และโซ่กิ่งของน้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 อะตอม ได้แก่ ไซโลส (xylose) และอะราบิโนส (arabinose) และน้ำตาลที่มีคาร์บอน 6 อะตอม ได้แก่ กลูโคส (glucose) แมนโนส (mannose) และกาแลคโตส (galactose) ไซโลสเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ในเฮมิเซลลูโลสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบตา (1,4) (β -1,4 bond) ซึ่งพบในไม้เนื้อแข็งมากกว่าไม้เนื้ออ่อน ทั้งนี้ไม่ค่อยพบเฮมิเซลลูโลสที่มีไซโลสเพียงชนิดเดียวในธรรมชาติ จึงมักพบอยู่รวมกับน้ำตาลชนิดอื่นๆ และมีส่วนของลิกนินจับตัวกันอยู่อย่างหนาแน่นด้วยพันธะโควาเลนต์ โดยทั่วไป เฮมิเซลลูโลสจะมีความเป็นกรด เนื่องจากมีหมู่ 4-เมธิล-แอลฟา-ดี-กลูโคส (4-methyl- α -D-glucose) จับอยู่กับออกซิเจนตำแหน่งที่ 2 ซึ่งการมีหมู่แทนที่ในตำแหน่งที่ 2 และ 3 (ดังแสดงในภาพที่ 2.3) ส่งผลให้สามารถสกัดเฮมิเซลลูโลสออกได้ง่ายด้วยสารละลายเบส แต่ขั้นตอนของการสกัดเฮมิเซลลูโลสออกนั้น อาจต้องมีการกำจัดลิกนิน (delignification) ร่วมด้วย



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส

ที่มา: Emanuel M. et al. (2013)

2.2.2.2 สมบัติของเฮมิเซลลูโลส

ส่วนใหญ่จะพบเฮมิเซลลูโลสในผนังเซลล์ชั้นนอกสุดของผนังเซลล์ชั้นที่ 2 โดยจะถูกย่อยสลาย และสกัดออกจากผนังเซลล์พืชได้ในภาวะที่ไม่รุนแรง เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลมีโซ่กิ่งเป็นจำนวนมากคล้ายกับโครงสร้างของเพกติน (Pectin) โมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสจะชอบน้ำทำให้

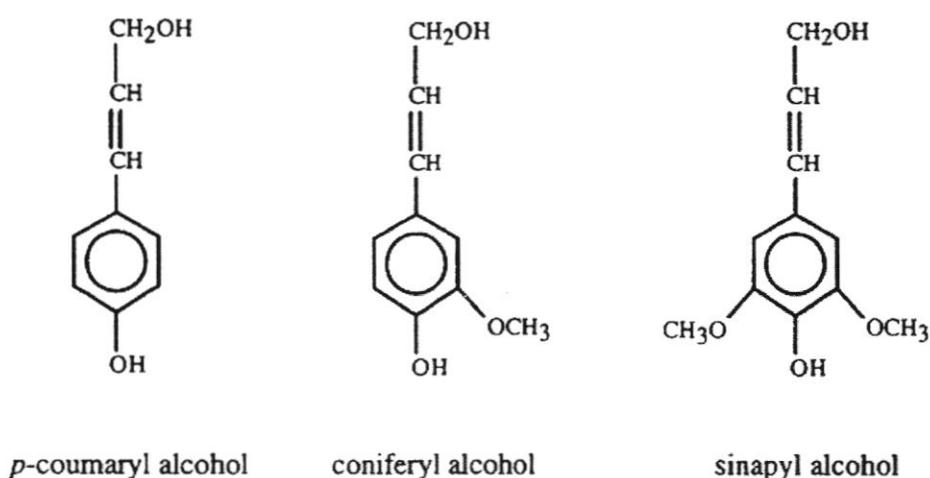
เกิดการรวมตัวกับน้ำเกิดเป็นเจลได้ขณะที่เมื่อเป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์จะไม่สามารถสกัดออกได้ด้วยน้ำแต่สามารถละลายได้ในเบส

2.2.3 ลิกนิน (lignin)

ลิกนินเป็นพอลิเมอร์ที่พบในผนังเซลล์พืชที่มีความสัมพันธ์เชิงโครงสร้างร่วมกับเซลลูโลส และพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดอื่นๆ ลิกนินประกอบด้วยโมเลกุลที่เป็นวงแหวนที่ต่อกันแบบสุ่ม เป็นโครงสร้าง 3 มิติ โดยภายในโครงสร้างจะเชื่อมกันด้วยพันธะอีเธอร์ (ether) หรือคาร์บอนระหว่าง 2 โมเลกุล ทำให้ลิกนินทนทานต่อการย่อยสลายด้วยสารเคมี และเอนไซม์มากกว่าพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ ดังนั้น จึงต้องอาศัยสารเคมีในการแยกลิกนินออกจากพอลิแซ็กคาไรด์

2.2.3.1 โครงสร้างของลิกนิน

ลิกนินมีโครงสร้างที่เกิดจากฟีนิลโพรพานอยด์ (phenyl propanoid) ซึ่งเป็นหน่วยย่อยของลิกนินประกอบกันเป็นโมเลกุลที่ใหญ่ที่มีหมู่เมธิลอยู่บนโมเลกุลลิกนินจากไม้เนื้ออ่อน หญ้า และไม้เนื้อแข็งมีองค์ประกอบของหมู่แทนที่พวกเมธอกซี (methoxy) และการเกิดพันธะระหว่างหมู่ฟีนิลที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูป 2.4



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของลิกนิน

ที่มา: Maria del Pilar Castillo (1997)

2.2.3.2 สมบัติของลิกนิน

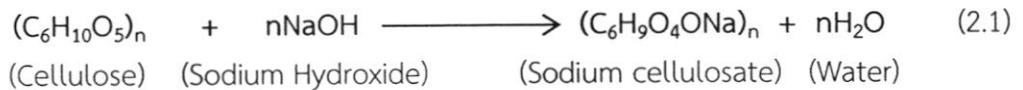
สมบัติที่สำคัญของลิกนินคือ ไม่ละลายน้ำและตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว ดังนั้น จึงสามารถสกัดลิกนินได้ด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีขั้วสูง แต่มีบางส่วนในกลุ่มของอัลคาไลน์ลิกนิน (alkaline lignin) ที่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายพวกไดออกเซน (dioxane), ไพริดีน (pyridine) และสารละลายเบสเจือจางได้นอกจากนี้เมื่อมีการเติมหมู่เมธิล (methylation) และหมู่อะซีทิล (acetylation) จะเกิดการแทนที่ขึ้นที่ตำแหน่งต่างๆ บนวงแหวนเบนซีน (benzene) ในโครงสร้างของลิกนิน ทำให้ลิกนินสามารถดูดกลืนแสง ทั้งนี้การเติมไฮดรอกซีไฮดรอกไซด์ก็เป็นการเพิ่มหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl) ให้แก่โครงสร้างของลิกนิน ทำให้ลิกนินสามารถดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตได้ที่มีความยาวคลื่นสูงสุด 280 นาโนเมตรได้ การที่ลิกนินอยู่ร่วมกับเซลลูโลสในเนื้อไม้ ทำให้โครงสร้างของพืชมีความ

แข็งแรงได้ตามธรรมชาติ รวมทั้งยังทำให้จุลินทรีย์ และเอนไซม์ไม่สามารถทำลายโครงสร้างพืชได้ง่าย โดยโครงสร้างที่ลิกนินอยู่ร่วมกับเซลลูโลสจะมีพันธะโควาเลนต์เชื่อมระหว่างลิกนิน และ เฮมิเซลลูโลส

2.3 ฟองน้ำเซลลูโลสสังเคราะห์

กระบวนการเตรียมฟองน้ำสังเคราะห์ผ่านกระบวนการของเหลวหนืด ซึ่งใช้กันแพร่หลายในอุตสาหกรรมวิสคอสเรยอน (viscose rayon) กระบวนการวิสคอสเรยอน ประกอบด้วยหลายขั้นตอน ดังต่อไปนี้ (Edward and Charles, 1997)

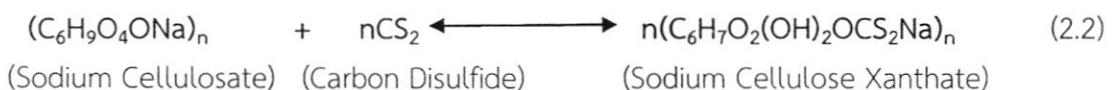
2.3.1 การแช่ (steeping) เป็นขั้นตอนในการทำให้เยื่อ (pulp) เป็นเซลลูโลสบริสุทธิ์โดยการขจัดเฮมิเซลลูโลสที่ละลายในด่าง (alkali-soluble hemicellulose) ออกด้วยการแช่เยื่อในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นประมาณร้อยละ 18 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิประมาณ 85 องศาเซลเซียส เพื่อให้เยื่อเซลลูโลสบวมตัว (swell) เนื่องจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ถูกดูดซึมเข้าสู่เยื่อด้วยคาปิลลารีแอ็คชัน (capillar action) แล้วแพร่เข้าสู่เส้นใยเซลลูโลสจะถูกเปลี่ยนเป็นโซเดียมเซลลูโลสเสท (sodium cellulosate) หรือโดยทั่วไปเรียกว่า อัลคาลิเซลลูโลส (alkali cellulose) หรือ ไวท์ครัมป์ (white crumb) ดังสมการที่ (1)



2.3.2 เป็นขั้นตอนการขจัดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ส่วนเกินออกจาก alkali cellulose crumb

2.3.3 การหมัก (aging) เป็นขั้นตอนควบคุมความหนืด (viscosity) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการผลิตและความยาวเฉลี่ยของสายโซ่พอลิเมอร์ (average chain length of polymer) หรือจำนวนหน่วยซ้ำในสายโซ่พอลิเมอร์ (degree of polymerization, DP) ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของเรยอน โดยการเก็บรักษา alkali cellulose crumb ภายใต้การควบคุมสภาวะที่เหมาะสมเพื่อให้สายโซ่เซลลูโลสสั้นลงและมี DP ตามต้องการก่อนที่จะทำปฏิกิริยาแซนเทชัน (Xanthation) ในขั้นตอนต่อไป โดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) เป็นปฏิกิริยาที่ใช้ในการทำให้สายโซ่เซลลูโลสสั้นลงเมื่อสายโซ่เซลลูโลสสั้นลง DP และความหนืดจะลดลง

2.3.4 ปฏิกิริยาแซนเทชัน (xanthation) เป็นขั้นตอนที่เปลี่ยนเซลลูโลสเป็นเซลลูโลสแซนเทท (cellulose xanthate) ซึ่งเป็นอนุพันธ์ที่ละลายน้ำได้แล้วใส่สารละลายคาร์บอนไดซัลไฟด์ (carbon disulfide, CS₂) เพื่อเปลี่ยน cellulose เป็น cellulose xanthate ดังสมการที่ (2)

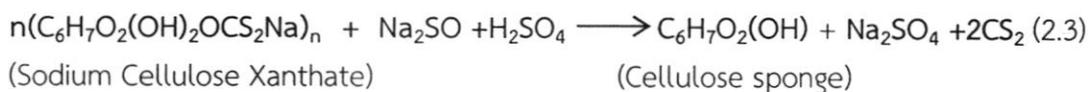


2.3.5 การละลาย (dissolving) เป็นขั้นตอนการเปลี่ยน xanthate crumb ที่มีสีเหลืองส้มให้เป็นสารละลายชั้นหนืดที่เรียกว่า วิสคอส (viscose) โดยละลาย xanthate crumb ด้วยสารละลาย

โซเดียมไฮดรอกไซด์จะเกิดปฏิกิริยาแซนเทชันและเกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (by product) ในอุณหภูมิ ต่ำเพื่อลดการสลายตัวของแซนเททและลดการเกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียง

2.3.6 การบ่ม (ripening) เป็นขั้นตอนเพื่อให้เส้นใยมีคุณภาพและมีสมบัติตามต้องการ

2.3.7 การขึ้นรูป ซึ่งจะเปลี่ยนจากเซลลูโลสแซนเททเป็นฟองน้ำเซลลูโลส โดยการเติมโซเดียมซัลเฟต (sodium sulfate, Na_2SO_4) แล้วขึ้นรูปด้วยกรดซัลฟิวริก (sulfuric acid, H_2SO_4) ทำให้ส่วน ที่หายไปของโซเดียมซัลเฟตกลายเป็นรูพรุน ดังสมการที่ (3) (Edward Cellulose Xanthate)



ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของฟองน้ำ

(1) ขนาดอนุภาคของวัสดุ ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอนุภาคของวัสดุกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทั้งนี้ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่ผิวก่อน ดังนั้นหากวัสดุมีพื้นที่ผิวมากขึ้น ปฏิกิริยาจะเกิดได้เร็วกว่า วัสดุชนิดเดียวกันที่มีพื้นที่ผิวต่ำกว่า (Ryan . and Radford C, 1987) นอกจากนี้จากผลการศึกษาโดย สุภาวดี ผลประเสริฐ (2557) พบว่าการบดเพื่อลดขนาดอนุภาคของฟางข้าว ส่งผลต่อ การลดจำนวน โครงสร้างแบบผลึกในเซลลูโลสลงด้วย ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการเกิดของโซเดียมเซลลูโลสแซนเททที่เป็น สารสำคัญต่อการเกิดรูพรุนในฟองน้ำเซลลูโลส

(2) ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นสูงกว่า ร้อยละ 18 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้เซลลูโลสย่อยสลายกลายเป็นน้ำตาลได้ง่าย (ศิริกัลยา สุวจิตานนท์ และคณะ, 2549) จึงส่งผลต่อการขึ้นรูปของฟองน้ำและการเกิดรูพรุนในโครงสร้างของเซลลูโลส

(3) ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ โดยทั่ว ๆ ความสามารถในการดูดซึมของเหลวจะเพิ่มขึ้นตาม ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น (Pan, Q. 2014) พบว่า การเพิ่มขึ้นของคาร์บอนไดออกไซด์ ส่งผลให้การดูดซึมมีค่าสูงขึ้น และมีค่าการดูดซึมสูงสุดที่คาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณ 20 ml.

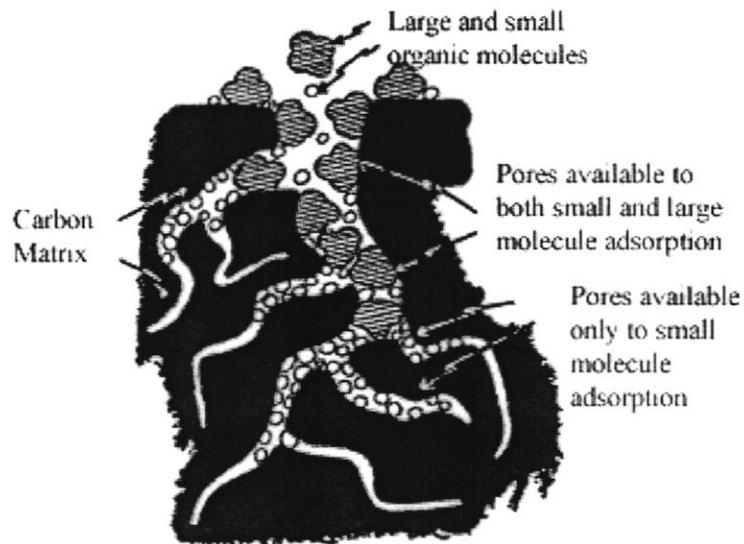
(4) เวลาบ่ม และอุณหภูมิ เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มค่าความหนืดจะลดลงในช่วงแรก (ประมาณชั่วโมงที่20) จากนั้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นค่าความหนืดจะเพิ่มขึ้นจนเท่ากับค่าความหนืดเริ่มต้น (ชั่วโมงที่0) ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการแทนที่ในปฏิกิริยา และเกิดการผันกลับของปฏิกิริยาของ หมู่ของแซนเทท (xanthate group) และการบ่มโดยธาตุอัลคาไล (Alkali) ความเข้มข้นของคาร์บอนได ออกไซด์ระยะเวลาการบ่มในขั้นตอน xanthogenate และอุณหภูมิการบ่มโดย Alkali ในขั้นตอนของ viscose process) มีผลต่อองค์ประกอบเป็นโพลิเมอร์โดยการบ่มจะทำให้องค์ประกอบเป็นโพลิเมอร์มีค่า ลดลง และองค์ประกอบเป็นโพลิเมอร์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความหนืดของของผสมหนืด นั่นคือหาก องค์ประกอบเป็นโพลิเมอร์มีค่าต่ำ ความหนืดของของผสมหนืดก็จะมีค่าต่ำ หรือหากองค์ประกอบเป็น โพลิเมอร์มีค่าสูง ความหนืดของของผสมหนืดก็จะมีค่าสูงตามไปด้วย และการบ่มในขั้นตอน xanthogenate (Loonberg, B. 1995)

(5) ปริมาณโซเดียมซัลเฟต ปริมาณโซเดียมซัลเฟตที่มากเกินไปทำให้เกิดการรวมตัวกันของ โซเดียมซัลเฟต ส่งผลให้ได้ฟองน้ำที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ซึ่งดูดซึมของเหลวได้น้อยกว่าฟองน้ำที่มีขนาด

รูปพรุนที่เล็กกว่า แต่มีการกระจายตัวของรูปพรุนสม่ำเสมอ (ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์ และคณะ, 2549)

2.4 การดูดซึม (Absorption)

การดูดซึมเป็นกระบวนการที่สาร หรือวัสดุชนิดหนึ่งแทรกซึมกระจายตัวเข้าไปทั่วในวัสดุอีกชนิดหนึ่ง ไม่เพียงบริเวณหน้าผิวสัมผัส



ภาพที่ 2.5 กระบวนการดูดซึม

ที่มา: extension publications (1974)

การดูดซึมนั้นจะมีกลไกของความดันคาปิลารี (capillary pressure) เข้ามาเกี่ยวข้อง โดยของเหลวจะถูกดึงเข้าสู่รูพรุนของวัสดุดูดซึมด้วยความดันคาปิลารี และในขณะเดียวกันของเหลวจะถูกอากาศในรูพรุนต้านทานของเหลวจะถูกดูดซึมเข้าสู่วัสดุดูดซึมจนกระทั่งความดันคาปิลารีเท่ากับความดันของอากาศภายในรูพรุน ของเหลวจะไม่ถูกดึงเข้าไปในรูพรุนอีก ต่ออากาศในรูพรุนจะละลายและแพร่ไปทั่วรูพรุนทำให้ของเหลวสามารถเข้าแทนที่อากาศไปเรื่อย ๆ จนกว่าอากาศจะละลายหมด (Iveson and Rutherford, 2001)



บทที่ 3 อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

3.1 เครื่องมือ และอุปกรณ์

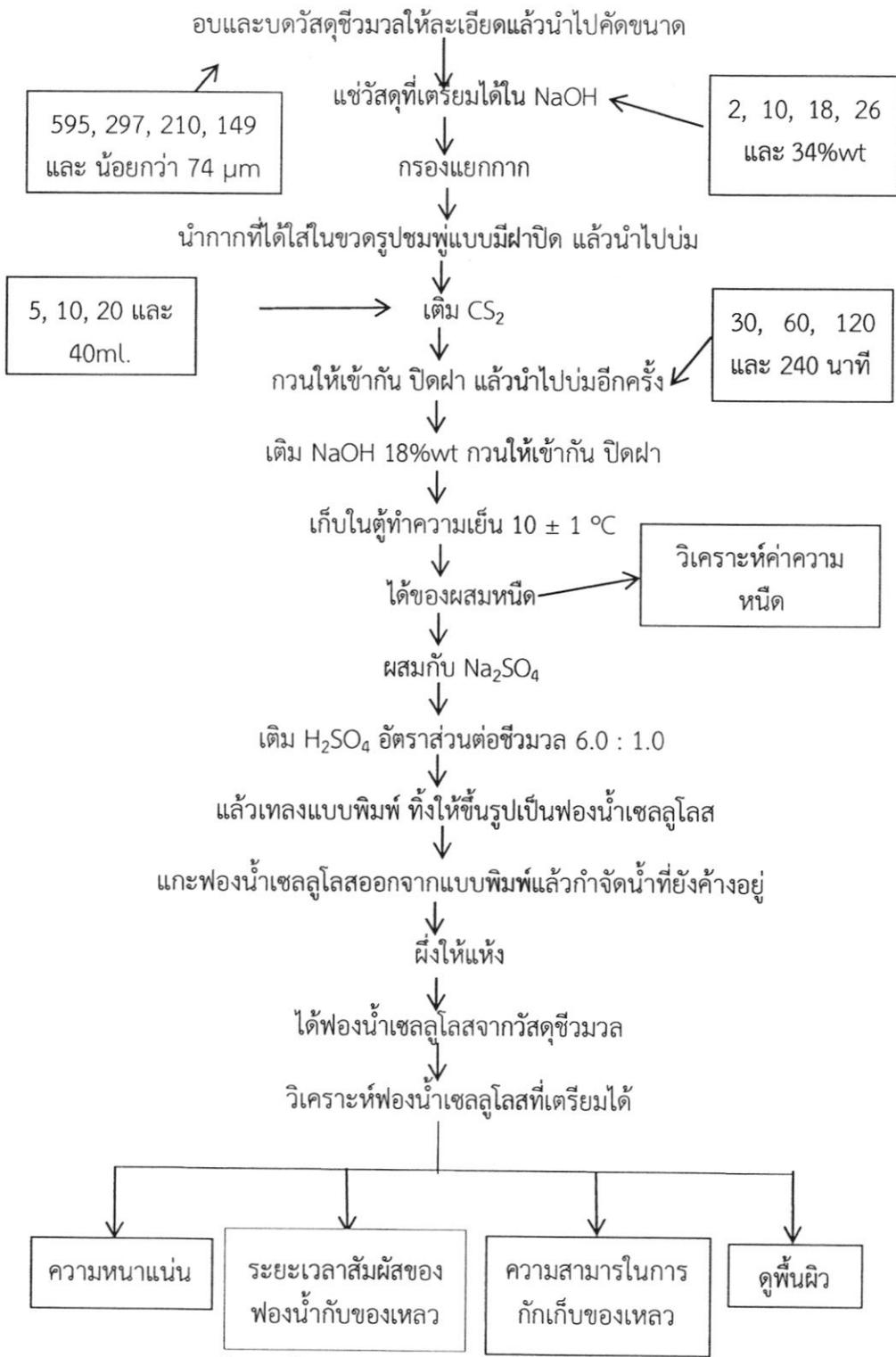
- 3.1.1 กรวยกรอง (funnel)
- 3.1.2 ชุดกรองสุญญากาศ (suction flash (buchner flash))
- 3.1.3 จุกยาง (stopper)
- 3.1.4 พาราฟิล์ม (parafilm)
- 3.1.5 แร่คัดขนาด (sieve)
- 3.1.6 กระจกนาฬิกา (watch glass)
- 3.1.7 ตู้อบไฟฟ้า (oven)
- 3.1.8 เครื่องชั่งน้ำหนัก ความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง (balance)
- 3.1.9 ปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump)
- 3.1.10 โถดูดความชื้น (desiccator)
- 3.1.11 เครื่องเขย่าแนวราบ (incubator Shaker)

3.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

- 3.2.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH, 18% w/w),
- 3.2.2 คาร์บอนไดซัลไฟด์ (Carbon disulfide, CS₂)
- 3.2.3 โซเดียมซัลเฟต (Sodium sulfate, Na₂SO₄)
- 3.2.4 กรดซัลฟิวริก (Sulfuric Acid, H₂SO₄)
- 3.2.5 อะซิโตน (Acetone)

3.3 วัตถุดิบที่ใช้

ฟางข้าวแห้งบด จากนาปี พ.ศ. 2560 ที่มีอายุหลังเก็บเกี่ยวไม่เกินสามเดือน จาก อำเภอนาสว่าง จังหวัดอุบลราชธานี



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมฟองน้ำเซลลูโลสจากชีวมวล

3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 การเตรียมวัสดุดิบ

นำฟางข้าวผึ่งแดดให้แห้งแล้วนำไปบดให้ละเอียด คัดขนาดด้วยร่อนขนาด 595 μm , 297 μm , 210 μm , 149 μm และน้อยกว่า 74 μm นำอบไล้ความชื้นที่ 105 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักคงที่

3.4.2 การเตรียมฟองน้ำเซลลูโลส

ภาพที่ 3.1 แสดงแผนผังขั้นตอนการศึกษาปัจจัยของขนาดอนุภาคของฟางข้าว ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ และเวลาบ่มหลังเติมคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ส่งผลต่อความหนืดของของเหลวหนืด ความหนาแน่น และความสามารถการดูดซับของเหลวของฟองน้ำเซลลูโลสที่สังเคราะห์ได้และมีรายละเอียดการดำเนินการศึกษาดังนี้

3.4.2.1 ขนาดอนุภาค

1) นำฟางข้าวที่เตรียมได้ที่ขนาด 595 μm , 297 μm , 210 μm , 149 μm และน้อยกว่า 74 μm ตามลำดับ แขนในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 18%wt ด้วยอัตราส่วน 3 กรัม ต่อ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 25 ml แล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 35 นาที ที่อุณหภูมิ 35 \pm 1 $^{\circ}\text{C}$ (ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์ และคณะ, 2549)

2) กรองแยกกากด้วยชุดกรองสุญญากาศ แล้วนำส่วนที่เป็นของแข็งใส่ลงในภาชนะที่มีฝาปิด จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 35 \pm 1 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3) เติมสารคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาตร 20 ml (อ้างอิงจากงานวิจัยของพัชรินทร์ คงดี และคณะ, 2555) กวนให้เข้ากัน ปิดฝา แล้วนำไปบ่มต่อ 35 \pm 1 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4) เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 18%wt ปริมาตร 25 ml ลงในสารตัวอย่าง กวนให้เข้ากัน ปิดฝา แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 10 \pm 2 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ได้ของเหลวหนืด

5) เติมสารโซเดียมซัลเฟตหนัก 6 กรัม ลงในของเหลวหนืดที่ได้จากข้อ 4

6) เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นลงไปในส่วนผสม 3 ml

7) เทส่วนผสมที่ได้ใส่แบบพิมพ์ รोजนกระทั่งฟองน้ำเซลลูโลสขึ้นรูป

8) แกะฟองน้ำเซลลูโลสที่ได้จากการขึ้นรูปออกจากพิมพ์ ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน (deionized water) แล้ววัดค่า pH จนกว่าจะมีค่าเป็นกลาง

9) ผึ่งหรืออบให้แห้ง แล้วนำไปวิเคราะห์สมบัติ

3.4.2.2 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

1) นำฟางข้าวขนาดอนุภาค 297 μm ซึ่งเป็นสถานะที่ฟองน้ำเซลลูโลสมีการดูดซึมน้ำและน้ำมันพืชดีที่สุดซึ่งได้จากข้อ 3.4.2.1 แขนในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2%, 10%, 18%, 26% และ 34%wt ตามลำดับ ด้วยอัตราส่วนฟางข้าว 3 กรัม ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 25 ml แล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 35 นาที ที่อุณหภูมิ 35 \pm 1 $^{\circ}\text{C}$

2) กรองแยกกากด้วยชุดกรองสุญญากาศ แล้วนำส่วนที่เป็นของแข็งใส่ลงในภาชนะที่มีฝาปิด จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 35 \pm 1 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3) เติมสารคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณประมาณ 20 ml กวนให้เข้ากัน ปิดฝา แล้วนำไปบ่มต่อ 35 ± 1 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4) เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 18%wt ปริมาตร 25 ml ลงในสารตัวอย่าง กวนให้เข้ากัน ปิดฝา แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 10 ± 2 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ได้ของเหลวเหนียว

5) เติมสารโซเดียมซัลเฟตหนัก 6 กรัม ลงในของเหลวเหนียวที่ได้จากข้อ 4

6) เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นลงไปในส่วนผสม 3 ml

7) เทส่วนผสมที่ได้ใส่แบบพิมพ์ รอจนกระทั่งฟองน้ำเซลลูโลสขึ้นรูป

8) แกะฟองน้ำเซลลูโลสที่ได้จากการขึ้นรูปออกจากพิมพ์ ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน (deionized Water) แล้ววัดค่า pH จนกว่าจะมีค่าเป็นกลาง

9) ผึ่งหรืออบให้แห้ง แล้วนำไปวิเคราะห์สมบัติ

3.4.2.3 ปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ (CS₂)

1) นำฟางข้าวขนาดอนุภาค 297 μm แขนในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นที่ 10%wt ซึ่งเป็นสถานะที่ทำให้ฟองน้ำเซลลูโลสมีความสามารถดูดซึมน้ำ และน้ำมันพืชดีที่สุดซึ่งทราบได้จากการศึกษาในข้อ 3.4.2.1 และ 3.4.2.2 ด้วยอัตราส่วนฟางข้าว 3 กรัม ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 25 ml. แล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 35 นาที ที่อุณหภูมิ 35 ± 1 °C

2) กรองแยกกากด้วยชุดกรองสุญญากาศ แล้วนำส่วนที่เป็นของแข็งใส่ลงในภาชนะที่มีฝาปิด จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 35 ± 1 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3) เติมสารคาร์บอนไดออกไซด์ลงในสารละลายตัวอย่างที่ได้ ที่ปริมาตร 5, 10, 20 และ 40 ml. ตามลำดับ กวนให้เข้ากัน ปิดฝา แล้วนำไปบ่มต่อ 35 ± 1 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4) เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 18 % โดยน้ำหนัก ปริมาตร 25 ml ลงในสารตัวอย่าง กวนให้เข้ากัน ปิดฝา แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 10 ± 2 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ได้ของเหลวเหนียว

5) เติมสารโซเดียมซัลเฟตหนัก 6 กรัม ลงในของเหลวเหนียวที่ได้จากข้อ 4

6) เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นลงไปในส่วนผสม 3 ml

7) เทส่วนผสมที่ได้ใส่แบบพิมพ์ รอจนกระทั่งฟองน้ำเซลลูโลสขึ้นรูป

8) แกะฟองน้ำเซลลูโลสที่ได้จากการขึ้นรูปออกจากพิมพ์ ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน (deionized water) แล้ววัดค่า pH จนกว่าจะมีค่าเป็นกลาง

9) ผึ่งหรืออบให้แห้ง แล้วนำไปวิเคราะห์สมบัติ

3.4.2.4 เวลาที่ใช้ ในการบ่มหลังเติมคาร์บอนไดออกไซด์

1) นำฟางข้าวขนาดอนุภาค 297 μm แขนในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นที่ 10%wt ซึ่งเป็นสถานะที่ทำให้ฟองน้ำเซลลูโลสมีความสามารถดูดซึมน้ำและน้ำมันพืชดีที่สุดซึ่งทราบได้จากการศึกษาในข้อ 3.4.2.1 และ 3.4.2.2 ด้วยอัตราส่วนฟางข้าว 3 กรัม ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 25 ml. แล้วตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 35 นาที ที่อุณหภูมิ 35 ± 1 °C

2) กรองแยกกากด้วยชุดกรองสุญญากาศ แล้วนำส่วนที่เป็นของแข็งใส่ลงในภาชนะที่มีฝาปิด จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 35 ± 1 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3) เติมสารคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาตร 20 ml. (เป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาในครั้งนี้ โดยพิจารณาจากข้อ 3.4.2.3) ลงในสารตัวอย่าง กวนให้เข้ากัน ปิดฝา แล้วนำไปบ่มต่อ 35 ± 1 °C เป็นเวลา 30, 60, 120 และ 240 นาที ตามลำดับ

4) เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 18 % โดยน้ำหนัก ปริมาตร 25 ml ลงในสารตัวอย่าง กวนให้เข้ากัน ปิดฝา แล้วนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 10 ± 2 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ได้ของเหลวหนืด

5) เติมสารโซเดียมซัลเฟตหนัก 6 กรัม ลงในของเหลวหนืดที่ได้จากข้อ 4

6) เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นลงไปในส่วนผสม 3 ml

7) เทส่วนผสมที่ได้ใส่แบบพิมพ์ รोजนกระทั่งฟองน้ำเซลลูโลสขึ้นรูป

8) แกะฟองน้ำเซลลูโลสที่ได้จากการขึ้นรูปออกจากพิมพ์ ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน (deionized water) แล้ววัดค่า pH จนกว่าจะมีค่าเป็นกลาง

9) ผึ่งหรืออบให้แห้ง แล้วนำไปวิเคราะห์สมบัติ

3.5 การวิเคราะห์สมบัติของเหลวหนืด และสมบัติของฟองน้ำเซลลูโลส

3.5.1 วิเคราะห์ค่าความหนืดของของเหลวหนืด

วิเคราะห์ค่าความหนืดสำหรับของเหลวหนืดด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบเข็ม (Needle Viscosity) HAAKE รุ่น Viscotester 6 plus

3.5.2 ความหนาแน่นของฟองน้ำเซลลูโลส

การทดสอบคุณสมบัติขั้นนี้ ทำการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D 3574 – 95 โดยนำฟองน้ำเซลลูโลสที่ทราบขนาดแน่นอน (กว้าง × ยาว × สูง) ดังแสดงในภาพที่ 3.2 ไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง แล้วคำนวณความหนาแน่นจาก สมการ (3.1)

$$\text{ความหนาแน่น} = \frac{\text{มวล (g)}}{\text{ปริมาตร (cm}^3\text{)}} \quad (3.1)$$

โดย ปริมาตร = กว้าง × ยาว × สูง



ภาพที่ 3.2 ตัวอย่างชิ้นงานฟองน้ำเซลลูโลสจากฟางข้าวที่นำมาวิเคราะห์

3.5.3 วิธีการวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซึมของเหลว

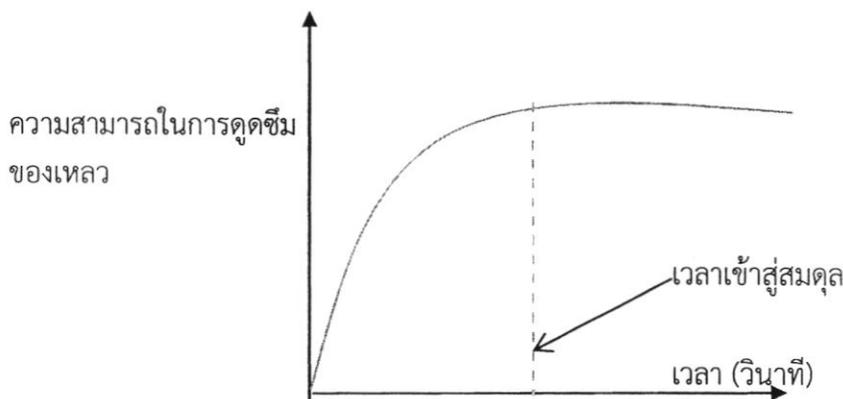
การวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซึมของเหลวของฟองน้ำเซลลูโลสที่เตรียมได้จาก ฟางข้าวสามารถทำได้โดย ศึกษาเวลาเข้าสู่สมดุลของการดูดซึม จากนั้นทำการศึกษาความสามารถในการดูดซึมของเหลวโดยใช้เวลาที่สภาวะสมดุลเป็นจุดอ้างอิงในการเปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซึมของเหลวของฟองน้ำที่เตรียมได้ที่สภาวะต่าง ๆ

3.5.3.1 การศึกษาเวลาที่สภาวะสมดุล

1) นำฟองน้ำตัวอย่างใส่ลงในขวดที่มีฝาปิดซึ่งบรรจุน้ำ หรือน้ำมันปริมาตร 200 ml แล้วนำเข้าเครื่องเขย่าแนวราบแบบควบคุมอุณหภูมิ ที่ช่วงเวลา 10 20 30 40 และ 50 นาที นำชิ้นงานผึ่งบนกระดาษกรองเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักแล้วคำนวณความสามารถในการกักเก็บของเหลวของฟองน้ำที่เวลาต่าง ๆ ด้วยสมการ (3.2) โดยที่หน่วยของความสามารถในการดูดซึมของเหลวของฟองน้ำจะถูกระบุในหน่วย กรัมของของเหลวที่ถูกดูดซึมต่อกรัมของฟองน้ำแห้ง หรือเรียกสั้น ๆ ว่า “จำนวนเท่า หรือ เท่า”

$$\text{ความสามารถในการดูดซึมของเหลว} = \frac{\text{น้ำหนักน้ำที่ดูดซึม}}{\text{น้ำหนักแห้ง}} \quad (3.2)$$

2) นำชุดข้อมูลที่ได้ มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซึมของเหลวกับเวลา ดังแสดงในภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 ความสามารถในการดูดซึมของเหลวเทียบกับเวลา

3.5.3.1 การศึกษาความสามารถในการดูดซึมของเหลว

นำฟองน้ำตัวอย่างใส่ลงในขวดที่มีฝาปิดซึ่งบรรจุน้ำ หรือน้ำมันปริมาตร 200 ml แล้วนำเข้าเครื่องเขย่าแนวราบแบบควบคุมอุณหภูมิ เป็นเวลาที่เท่ากับเวลาสมดุล ที่ได้จากการศึกษาก่อนหน้า นำชิ้นงานผึ่งบนกระดาษกรองเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักแล้วคำนวณความสามารถในการกักเก็บของเหลวของฟองน้ำ ด้วยสมการ (3.2)

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและอภิปรายผล

การศึกษาปัจจัยของขนาดอนุภาค ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ และระยะเวลาบ่มหลังเติมโซเดียมไดออกไซด์ต่อความหนืดของของเหลวหนืด การขึ้นรูปได้ของฟองน้ำเซลลูโลส และคุณสมบัติของฟองน้ำเซลลูโลส ซึ่งได้แก่ ความหนาแน่น และความสามารถในการดูดซับของเหลวของฟองน้ำเซลลูโลสที่เตรียมได้จากฟางข้าว ได้ผลการศึกษาดังนี้

4.1 ปัจจัยของอนุภาคต่อค่าความหนืดของของเหลวหนืด และสมบัติของฟองน้ำเซลลูโลสจากฟางข้าว

การศึกษาปัจจัยของขนาดอนุภาคต่อค่าความหนืดของของเหลวหนืด และสมบัติของฟองน้ำเซลลูโลสที่เตรียมได้ สามารถทำได้โดยการเตรียมฟองน้ำเซลลูโลสจากฟางข้าว ที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 595, 297, 210, 149 และน้อยกว่า 74 ไมครอน (μm) ที่สภาวะตัวแปรอื่นๆ คงที่ ได้ผลการศึกษาดังตารางที่ 4.1 พบว่า การเพิ่มขึ้นของขนาดอนุภาคฟางข้าวมีแนวโน้มที่จะส่งผลให้ความหนืดของของเหลวหนืดมีค่าเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากอนุภาคฟางข้าวที่มีขนาดใหญ่กว่ามีพื้นที่สัมผัส (surface area) น้อยกว่าฟางข้าวที่มีขนาดอนุภาคเล็ก ทำให้โครงสร้างของเซลลูโลสไม่ถูกทำลาย เมื่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึมเข้าสู่เส้นใยเซลลูโลส ด้วยคาปิลลารีแอคชัน (Capillar action) จึงเกิดเซลลูโลสเสท (Sodium cellulose) หรือโดยทั่วไปเรียกว่า อัลคาไลเซลลูโลส (Alkali cellulose) หรือ White crumb ดังสมการ (2.1) (ศศิประภา รัตนดิถ ฌ ภูเก็ด, 2558) ซึ่งโซเดียมเซลลูโลสเสทเป็นสารตั้งต้นของโซเดียมเซลลูโลสแซนเทส ดังแสดงในสมการที่ (2.2) สารทั้งสองผสมรวมกันอยู่ในรูปของของเหลวหนืด ซึ่งส่งผลให้ความหนืดของของเหลวหนืดจากฟางข้าวขนาดใหญ่สูงกว่าของเหลวหนืดจากฟางข้าวที่มีขนาดเล็กกว่า

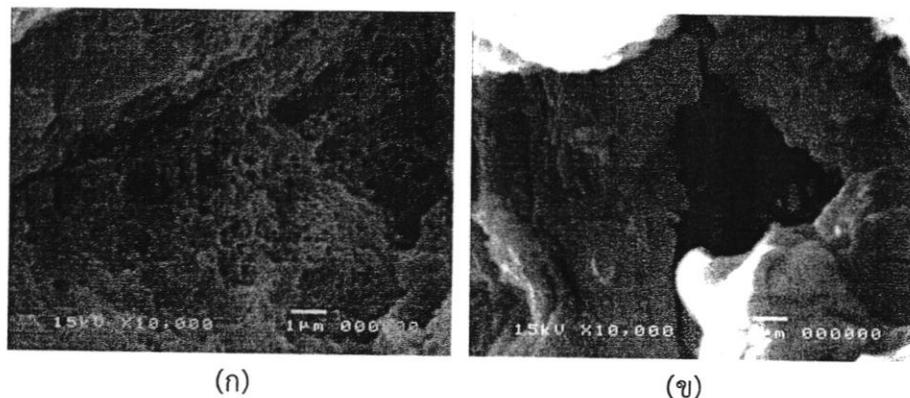
จากตารางที่ 4.1 พบว่าฟองน้ำเซลลูโลสที่เตรียมได้จาก ฟางข้าวขนาดเฉลี่ยระหว่าง 297 - 210 μm สามารถขึ้นรูปเป็นฟองน้ำเซลลูโลสได้ ดังนั้นฟองน้ำเซลลูโลสที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 297 และเล็กกว่า 210 จึงไม่สามารถขึ้นรูปเป็นฟองน้ำเซลลูโลสได้ การทดลองครั้งนี้ฟางข้าวที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 595 149 และเล็กกว่า 74 μm จึงไม่สามารถขึ้นรูปได้ อาจเนื่องจากฟางข้าวที่มีขนาดอนุภาคใหญ่มีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อย ทำให้โซเดียมไฮดรอกไซด์แทรกเข้าไปในโครงสร้างของเซลลูโลสได้น้อยกว่า จึงทำให้เซลลูโลสเสทที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยกว่าที่อนุภาคฟางข้าวเล็กกว่า เนื่องจากปฏิกิริยาทางกายภาพ และเคมี ส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นกับวัสดุนั้น จะเกิดขึ้นที่ผิวก่อน หากวัสดุชิ้นใดมีพื้นที่ผิวมากขึ้น ปฏิกิริยาก็จะเกิดได้เร็วขึ้น ตรงข้ามกับวัสดุชนิดเดียวกันที่มีพื้นที่ผิวน้อย ปฏิกิริยาก็จะเกิดได้ช้ากว่า (Ryan and Radford , 1987) แต่สำหรับฟางข้าวที่มีขนาดเล็กกว่า 210 μm โซเดียมอาจแทรกเข้าไปในโครงสร้างเซลลูโลสมากเกินไปจึงทำให้โครงสร้างเซลลูโลสแตกออกและจากผลการศึกษาโดยสุภาวดี ผลประเสริฐ (2557) พบว่าการบดเพื่อลดขนาดอนุภาคของฟางข้าว ส่งผลต่อการลดจำนวนโครงสร้างแบบผลึกในเซลลูโลสลงด้วย ซึ่งการลดลงของโครงสร้างผลึกในเซลลูโลสนี้เป็นเหตุผลหลักที่

ทำให้ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นฟองน้ำเซลลูโลสได้ เนื่องจากการเกิดของเซลลูโลสเฮท และโซเดียมเซลลูโลส เซนเทท จะเกิดขึ้นได้น้อยลง

ตารางที่ 4.1 ค่าความหนืดของของเหลวหนืด การขึ้นรูปและคุณสมบัติของฟองน้ำเซลลูโลส ที่เตรียมจากฟางข้าวที่เตรียมจากฟางข้าวขนาดอนุภาคต่าง ๆ

ขนาดอนุภาค (μm)	ความหนืดของของเหลวหนืด (mPas)	ฟองน้ำเซลลูโลส			
		การขึ้นรูป	ความหนาแน่น (g/cm^3)	ความสามารถในการดูดซึมน้ำ (เท่าของน้ำหนักแห้ง)	ความสามารถในการดูดซึมน้ำมันพืช (เท่าของน้ำหนักแห้ง)
595	30,000	ไม่ได้	-	-	-
297	22,200	ได้	0.79	2.17	1.65
210	21,300	ได้	0.76	1.60	1.49
149	-	ไม่ได้	-	-	-
น้อยกว่า 74	-	ไม่ได้	-	-	-

เมื่อพิจารณาสมบัติด้านความหนาแน่น ความสามารถในการดูดซึมน้ำ และน้ำมันพืชของฟองน้ำเซลลูโลสที่เตรียมได้ พบว่าการเพิ่มขนาดอนุภาคเฉลี่ยฟางข้าวจาก 210 μm ไปเป็น 297 μm ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความหนาแน่นของฟองน้ำเซลลูโลสที่เตรียมได้ แต่มีแนวโน้มที่ทำให้ความสามารถในการดูดซึมน้ำและน้ำมันพืชของฟองน้ำเซลลูโลสที่เตรียมได้เพิ่มขึ้น อาจเนื่องจากขนาดรูพรุนที่เกิดในฟองน้ำเซลลูโลสที่เตรียมได้จากฟางข้าวขนาด 297 μm มีขนาดเล็ก และมีการกระจายตัวของรูพรุนขนาดเล็กที่ดีกว่าฟองน้ำเซลลูโลสที่เตรียมได้จากฟางข้าวขนาด 210 μm (พิจารณาภาพที่ 4.1) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของนฤมล ศรีวิฑูรย์ (2548) ที่พบว่าการเกิดช่องว่างขนาดใหญ่ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการกักเก็บน้ำของฟองน้ำเซลลูโลสลดลง ดังนั้นฟางข้าวขนาดอนุภาค 297 μm จึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการศึกษาต่อไป โดยพิจารณาจากความสามารถในการดูดซึมน้ำ และน้ำมันพืช



ภาพที่ 4.1 พื้นผิวฟองน้ำเซลลูโลสที่เตรียมจากสภาวะฟางข้าวขนาด (ก) 297 μm และ (ข) 210 μm

4.2 ปัจจัยของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อค่าความหนืดของของเหลวหนืด และสมบัติของฟองน้ำเซลลูโลสจากฟางข้าว

สำหรับการศึกษาในหัวข้อนี้ สามารถทำได้โดยการนำฟางข้าวอนุภาคเฉลี่ย 297 μm แซ่ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 2, 10, 18, 26 และ 34%wt ที่สภาวะตัวแปรอื่นๆ คงที่ ผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ส่งผลให้ความหนืดของของเหลวหนืดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มากเกินไปพอที่จะทำให้เกิดการลดลงของความเป็นพอลิเมอร์ (Depolymerize) ส่งผลให้ความยาวเฉลี่ยของสายโซ่พอลิเมอร์ลดลง หรือจำนวนหน่วยซ้ำในสายโซ่พอลิเมอร์เพิ่มขึ้น (ศศิประภา รัตนดิถกณ ภูเก็ท, 2558) เมื่อสายโซ่เซลลูโลสสั้นลงได้โดยต่างมีผลทำให้ส่วนที่เป็นโครงร่างผลึก (crystalline) ในเซลลูโลสเกิดการบวมตัว (swelling) และอาจมีน้ำตาลบางส่วนหลุดออกมาจากสายโพลิแซคคาไรด์ เมื่อมีปริมาณอนุภาคของโซเดียมมากเกินไปพอที่จะเป็นผลทำให้การออกซิเจนเข้าแทรกไปที่ตำแหน่งเบต้า-1,4-กลูโคซิดิก ออกซิเจน บอนด์ (Beta - 1,4 - Glucosidic Oxygen Bond) ได้ดีขึ้น (นฤมล ศรีวิฑูรย์, 2548) ความหนืดของของเหลวหนืดจึงลดลง

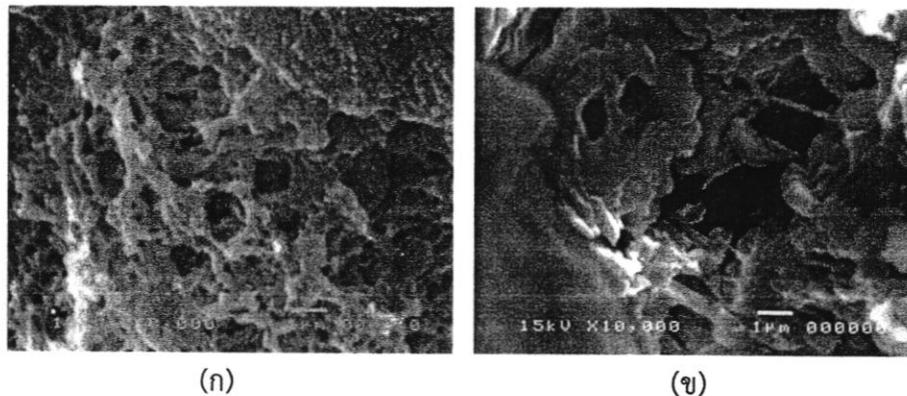
จากตารางที่ 4.2 พบว่าฟองน้ำเซลลูโลสที่เตรียมได้ในสภาวะความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 10 18 และ 26%wt สามารถขึ้นรูปได้ แต่ที่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 34%wt ไม่สามารถขึ้นรูปได้ เนื่องจากปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์มีมากเกินไปทำให้เซลลูโลสสูญเสียความเป็นพอลิเมอร์ ซึ่งมีความสำคัญต่อการขึ้นรูปของฟองน้ำเซลลูโลส ดังนั้นฟองน้ำเซลลูโลสที่เตรียมด้วยสภาวะความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 34%wt จึงไม่สามารถขึ้นรูปได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของศิริกัลยา สุวจิตตานนท์ และคณะ (2549) ว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 18%wt เป็นผลให้เซลลูโลสสามารถเปลี่ยนไปเป็นน้ำตาลได้ง่าย

ตารางที่ 4.2 ค่าความหนืดของของเหลวหนืด การขึ้นรูปและคุณสมบัติของฟองน้ำเซลลูโลสจากฟางข้าว ที่เตรียมจากความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้น โซเดียมไฮดรอก ไซด์(% w/w)	ความหนืด ของของเหลว หนืด (mPas)	ฟองน้ำเซลลูโลส			
		การขึ้น รูป	ความ หนาแน่น (g/cm^3)	ความสามารถในการ ดูดซึมน้ำ (เท่าของน้ำหนักแห้ง)	ความสามารถในการ ดูดซึมน้ำมันพืช (เท่าของน้ำหนักแห้ง)
2	43,600	ได้	0.715	2.34	0.54
10	23,700	ได้	0.33	3.16	1.66
18	22,200	ได้	0.57	2.18	1.65
26	12,600	ได้	0.82	2.62	1.30
34	0	ไม่ได้	-	-	-

เมื่อพิจารณาสมบัติด้านความหนาแน่น ความสามารถในการดูดซึมน้ำ และน้ำมันพืชของฟองน้ำเซลลูโลสที่เตรียมได้ พบว่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความหนาแน่นของฟองน้ำเซลลูโลสที่เตรียมได้ แต่ไม่สามารถสรุปความสัมพันธ์ที่ชัดเจนระหว่างปัจจัย

ดังกล่าวต่อความหนาแน่นของฟองน้ำเซลลูโลสที่เตรียมได้ นอกจากนี้ผลการศึกษายังชี้ให้เห็นว่าความสามารถในการดูดซึมน้ำ และน้ำมันพืชมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของโซเดียม หรือความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 2 เป็น 10%wt จากนั้นพบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้ความสามารถในการดูดน้ำ และน้ำมันพืชมีค่าลดลง โดยค่าความสามารถในการดูดน้ำ และน้ำมันพืชของฟองน้ำเซลลูโลสที่เตรียมได้มีค่าสูงสุดเท่ากับ 3.16 และ 1.66 ตามลำดับ เมื่อเตรียมฟองน้ำเซลลูโลสด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10%wt ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของสุวรรณ ละเอียดอินทร์ และคณะ (2553) ซึ่งศึกษาปัจจัยของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสมบัติการดูดซึมน้ำของฟองน้ำเซลลูโลส และพบว่าสภาวะที่ดีที่สุดของการเตรียมฟองน้ำเซลลูโลสจากฟางข้าว คือที่สภาวะความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10%wt เช่นเดียวกันกับการศึกษาในครั้งนี้ ทั้งนี้เนื่องจากรูพรุนที่เกิดในฟองน้ำเซลลูโลสที่เตรียมได้จากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10%wt มีจำนวนมากกว่าที่สภาวะความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์อื่น ๆ ภาพที่ 4.2 แสดงขนาด และการกระจายรูพรุนของฟองน้ำเซลลูโลสจากฟางข้าวที่เตรียมด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 %wt (ภาพที่ 4.2 (ก)) และ 2%wt (ภาพที่ 4.2 (ข)) ซึ่งพบว่าที่สภาวะความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10%wt มีการกระจายขนาดรูพรุนที่ดีกว่าที่สภาวะความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2%wt ดังนั้นความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 10%wt จึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการศึกษาต่อไป เมื่อพิจารณาจากความสามารถในการดูดซึมน้ำและน้ำมันพืช



ภาพที่ 4.2 พื้นที่ผิวฟองน้ำเซลลูโลสจากฟางข้าวที่เตรียมจากสารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น (ก) 10%wt และ (ข) 2%wt

4.3 ปัจจัยของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ต่อค่าความหนืดของของเหลวหนืด และสมบัติของฟองน้ำเซลลูโลสจากฟางข้าว

ในการศึกษาปัจจัยของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ต่อค่าความหนืดของของเหลวหนืด และสมบัติของฟองน้ำเซลลูโลสที่เตรียมได้ทำการศึกษาด้วยฟางข้าวอนุภาคเฉลี่ย $297 \mu\text{m}$ และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 10%wt ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากหัวข้อ 4.1 และ 4.2 กรองแยกกาก จากนั้นเติมคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปริมาณ 5, 10, 20 และ 40 มิลลิลิตร ที่สภาวะตัวแปร

อื่น ๆ คงที่ ผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ส่งผลให้ความหนืดของของเหลวหนืดเพิ่มขึ้น อาจเนื่องจากการเพิ่มปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้โซเดียมเซลลูโลสเกิดไปเป็นโซเดียมเซลลูโลสเซนเททมากขึ้น จึงส่งผลให้ความหนืดของของเหลวหนืดมีค่าเพิ่มขึ้น ดังที่ได้อธิบายไว้แล้วข้างต้น โดยผลการศึกษาครั้งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Pan, Q. (2014) การเตรียมแซนเททจากฟางข้าว และศึกษาคุณสมบัติในการดูดซับแคดเมียม ซึ่งพบว่าผลของการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 20 ml. ส่งผลให้การดูดซึมน้ำมากที่สุด คาร์บอนไดออกไซด์ที่มากเกินไปมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาอุกษัย ไม่เป็นประโยชน์กับปฏิกิริยาหลักและลดอัตราการผลิตในการเตรียม

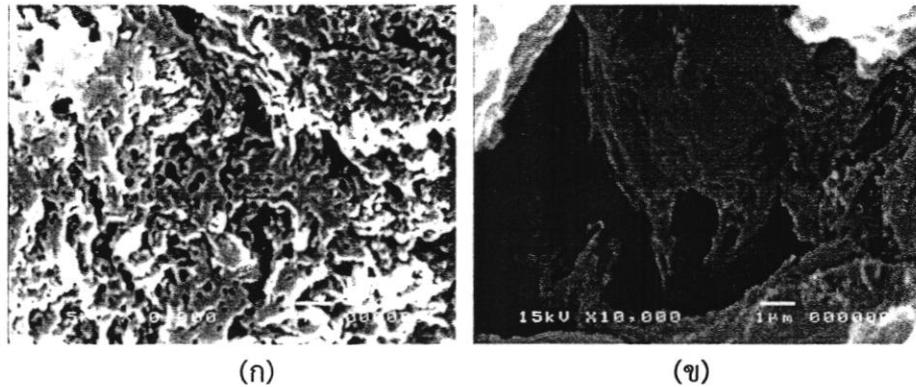
นอกจากนี้ตารางที่ 4.3 ยังพบว่าฟองน้ำเซลลูโลสซึ่งเตรียมที่สภาวะคาร์บอนไดออกไซด์ 5, 10, 20 และ 40 มิลลิลิตร นั้นสามารถขึ้นรูปเป็นฟองน้ำเซลลูโลสเซลลูโลสได้ทั้งหมด เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณมากเกินไปจะทำให้สารเซลลูโลสเปลี่ยนไปเป็นเซลลูโลสเซนเทท ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญต่อการขึ้นรูปฟองน้ำเซลลูโลสในกระบวนการเตรียมฟองน้ำเซลลูโลส ทั้งนี้หากคาร์บอนไดออกไซด์มีปริมาณที่ไม่เพียงพอต่อการเกิดโซเดียมเซลลูโลสเซนเทท โซเดียมเซลลูโลสเซนเทท จะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับไปเป็นโซเดียมเซลลูโลส ทำให้ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นฟองน้ำเซลลูโลสได้

ตารางที่ 4.3 ค่าความหนืดของของเหลวหนืด การขึ้นรูปและคุณสมบัติของฟองน้ำเซลลูโลสจากฟางข้าว ที่เตรียมจากคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปริมาณของต่าง ๆ

ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ (มิลลิลิตร)	ความหนืดของของเหลวหนืด (mPas)	ฟองน้ำเซลลูโลส			
		การขึ้นรูป	ความหนาแน่น (g/cm ³)	ความสามารถในการดูดซึมน้ำ (เท่าของน้ำหนักแห้ง)	ความสามารถในการดูดซึมน้ำมันพืช (เท่าของน้ำหนักแห้ง)
5	29,300	ได้	0.56	2.87	0.93
10	32,400	ได้	0.78	3.27	0.53
20	34,500	ได้	0.65	4.42	1.72
40	36,600	ได้	0.53	3.92	0.72

เมื่อพิจารณาสมบัติด้านความหนาแน่น ความสามารถในการดูดซึมน้ำ และน้ำมันพืชของฟองน้ำเซลลูโลสที่เตรียมได้ พบว่าปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความหนาแน่น ความสามารถในการดูดซึมน้ำ และน้ำมันของฟองน้ำเซลลูโลสที่เตรียมได้ แต่อย่างไรก็ตามผลการศึกษาในครั้งนี้ไม่สามารถสรุปรูปแบบความสัมพันธ์ที่ชัดเจนระหว่างปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ ต่อสมบัติดังกล่าวของฟองน้ำเซลลูโลสที่เตรียมได้ได้ เมื่อพิจารณาจากความสามารถในการดูดซึมน้ำ และน้ำมันของฟองน้ำเซลลูโลสที่เตรียมได้ สามารถกล่าวได้ว่าปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 20 มิลลิลิตร มีความเหมาะสมต่อการเตรียมฟองน้ำเซลลูโลสจากฟางข้าวเนื่องจากให้ค่าความสามารถในการดูดซึมน้ำ และน้ำมันเท่ากับ 4.42 และ 1.72 เท่าของน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ภาพที่ 4.3 แสดงขนาด และการกระจายรูพรุนของฟองน้ำเซลลูโลสจากฟางข้าวที่เตรียมที่สภาวะ (ก) คาร์บอนไดออกไซด์ 20 มิลลิลิตร และ (ข) คาร์บอนไดออกไซด์ 5 มิลลิลิตร การใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่ปริมาณ 20 มิลลิลิตร ทำให้ได้

รูปพรุนที่มีขนาดเล็กกว่า และมีการกระจายรูปพรุนที่มากกว่าการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่ 5 มิลลิลิตร จึงอาจเป็นเหตุให้ฟองน้ำเซลลูโลสที่เตรียมที่สภาวะคาร์บอนไดออกไซด์ 20 มิลลิลิตร มีความสามารถในการดูดซึมน้ำ และมันพิซสูงกว่าการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่ 5 มิลลิลิตร



ภาพที่ 4.3 พื้นที่ผิวฟองน้ำเซลลูโลสที่เตรียมจากสภาวะคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปริมาณ (ก) 20 มิลลิลิตร และ (ข) 5 มิลลิลิตร

4.4 ปัจจัยของเวลาบ่มหลังเติมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อค่าความหนืดของของเหลวหนืด และสมบัติของฟองน้ำเซลลูโลสจากฟาง

ในส่วนของการศึกษาเวลาบ่มหลังเติมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อค่าความหนืดของของเหลวหนืด และสมบัติของฟองน้ำเซลลูโลส ทำได้โดยการนำฟางข้าวอนุภาคเฉลี่ย $297 \mu\text{m}$ แช่ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 10%wt กรองแยกกาก จากนั้นเติมคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปริมาณ 20 มิลลิลิตร และบ่มที่เวลา 30 60 120 และ 240 นาที ได้ผลการศึกษาเป็นไปตามตารางที่ 4.4 พบว่าเมื่อใช้เวลาในการบ่มนานขึ้น ความหนืดของของเหลวหนืดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากเวลาในการบ่มที่นานขึ้นอาจทำให้โซเดียมเซลลูโลสที่ถูกเปลี่ยนไปเป็นโซเดียมเซลลูโลสแซนเททได้มากขึ้น ทำให้ของเหลวหนืดจึงมีความหนืดเพิ่มขึ้นตามเวลาในการบ่ม

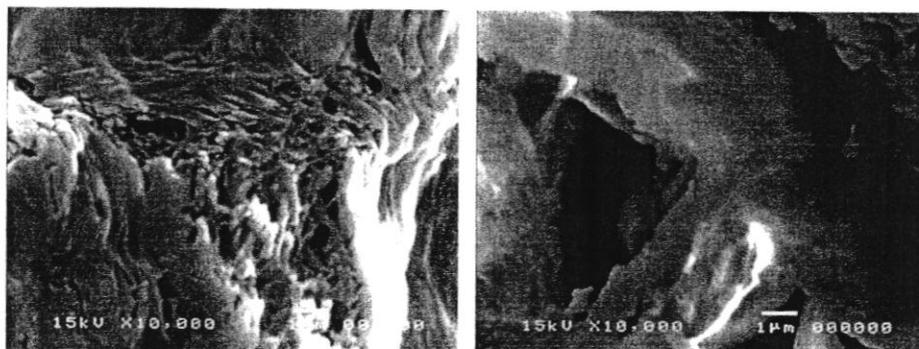
ผลการขึ้นรูปในตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าเวลาบ่มหลังเติมคาร์บอนไดออกไซด์นั้นไม่ส่งผลใดต่อการขึ้นรูปได้ของฟองน้ำเซลลูโลสที่เตรียมได้ โดยฟองน้ำเซลลูโลสที่ได้จากการบ่มที่เวลา 30 ถึง 240 นาทีนั้น สามารถขึ้นรูปเป็นฟองน้ำเซลลูโลสได้ทั้งหมด จากที่ได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 4.1 และ 4.2 การขึ้นรูปได้ของฟองน้ำเซลลูโลสนั้น เป็นผลมาจากการไม่สูญเสียโครงสร้างผลึกเซลลูโลส ซึ่งเป็นโครงสร้างหลังของการเกิดเป็นฟองน้ำ ซึ่งสาเหตุหลักที่จะทำให้เกิดความเสียหายของโครงสร้างเซลลูโลส คือ การบดลดขนาดของอนุภาคซึ่งมีผลต่อโครงสร้างผลึกของเซลลูโลส ดังนั้นหากมีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในสัดส่วนที่เหมาะสมฟองน้ำเซลลูโลสที่เตรียมได้จะสามารถขึ้นรูปได้ทั้งหมด ไม่ว่าจะบ่มด้วยเวลานานเพียงใดก็ตาม

นอกจากนี้ผลการศึกษาในส่วนนี้ ยังชี้ให้เห็นว่าระยะเวลาบ่มหลังเติมคาร์บอนไดออกไซด์นั้นส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติของฟองน้ำเซลลูโลส โดยเมื่อพิจารณาสมบัติด้านความหนาแน่น ความสามารถในการดูดซึมน้ำ และน้ำมันพิซของฟองน้ำเซลลูโลสที่เตรียมได้ พบว่าเมื่อเวลาบ่มนานขึ้น

ส่งผลให้ความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากในส่วนของโครงสร้างที่เป็นโซเดียมเซลลูโลสเซนเทท ในโครงสร้างของเซลลูโลส นั้นจะเกิดปฏิกิริยากับโซเดียมไดซัลเฟตแล้วเมื่อล้างออกด้วยกรดซัลฟิวริก บริเวณนั้นจะกลายเป็นช่องว่างภายในเนื้อของฟองน้ำเซลลูโลส เมื่อใช้เวลาดบ่มเพิ่มมากขึ้น โซเดียมเซลลูโลสจะเกิดเป็นโซเดียมโซเดียมเซลลูโลสเซนเททมากขึ้นจนถึงจุดที่เกิดปฏิกิริยาพอลิกับ ปริมาณของคาร์บอนไดซัลไฟด์ ซึ่งเป็นเวลาที่ทำให้เกิดรูพรุนได้มากที่สุด ก่อนที่จะสูญเสียคาร์บอน ไดซัลไฟด์ออก เนื่องจากปฏิกิริยาย้อนกลับของโซเดียมเซลลูโลสเซนเททไปเป็นโซเดียมเซลลูโลสเซนเทท (พิจารณาสมการที่ (2.2)) ทำให้รูพรุนภายในฟองน้ำเซลลูโลสมีโอกาสเกิดได้น้อยลง ความหนาแน่นจึง ลดลงเมื่อเวลาดบ่มมากขึ้น แต่ในส่วนของความสามารถการดูดซึมน้ำ และน้ำมันพืช ที่เวลาดบ่ม 60 นาที นั้น พบว่ามีความสามารถการดูดซึมของทั้งน้ำ และน้ำมันพืชสูงสุด คือ 4.03 และ 1.73 เท่าของ น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ อาจเนื่องมาจากมีผลมาจากการบ่มที่ 60 นาทีนั้นการเกิดเป็นโซเดียมเซลลูโลส เซนเททในของเหลวชนิดผสมนั้นมีปริมาณมากที่สุดจึงส่งผลให้รูพรุนที่เกิดขึ้นในฟองน้ำเซลลูโลสมี จำนวนมากที่สุดสำหรับการศึกษาในครั้งนี้ (พิจารณาภาพที่ 4.4)

ตารางที่ 4.4 ค่าความหนืดของของเหลวชนิด การขึ้นรูปและคุณสมบัติของฟองน้ำเซลลูโลส ที่เตรียมจากเวลาดบ่มหลังเติมคาร์บอนไดซัลไฟด์ต่างๆ

เวลาดบ่มหลังเติมคาร์บอนไดซัลไฟด์ (นาที)	ความหนืดของของเหลวชนิด (mPas)	ฟองน้ำเซลลูโลส			
		การขึ้นรูป	ความหนาแน่น (g/cm^3)	ความสามารถในการดูดซึมน้ำ (เท่าของน้ำหนักแห้ง)	ความสามารถในการดูดซึมน้ำมันพืช (เท่าของน้ำหนักแห้ง)
30	38,700	ได้	0.65	2.72	1.03
60	38,700	ได้	0.55	4.03	1.73
120	41,600	ได้	0.50	3.46	1.70
240	46,500	ได้	0.52	2.97	1.30



(ก)

(ข)

ภาพที่ 4.4 พื้นผิวฟองน้ำเซลลูโลสที่เตรียมจากสถานะเวลาดบ่มหลังเติมคาร์บอนไดซัลไฟด์ที่ ปริมาณ (ก) 60 นาที และ (ข) 30 นาที

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาปัจจัยของขนาดอนุภาคของวัสดุชีวมวล ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ และเวลาบ่มหลังเติมคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อความหนืดของของเหลวหนืด การขึ้นรูปได้ และสมบัติของฟองน้ำเซลลูโลสด้วยวัสดุชีวมวลจากฟางข้าว ผ่านกระบวนการของเหลวหนืดแล้วขึ้นรูปเป็นฟองน้ำเซลลูโลส ได้ข้อสรุปดังต่อไปนี้

ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของฟางข้าว ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ และเวลาบ่มหลังเติมคาร์บอนไดออกไซด์ ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความหนืดของของเหลวหนืด และสมบัติของฟองน้ำเซลลูโลส ได้แก่ ความหนาแน่น ความสามารถในการดูดซึมน้ำ และน้ำมันพืช โดยการเพิ่มขนาดอนุภาคเฉลี่ยและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ความหนืดของของเหลวหนืดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ และเวลาที่ใช้บ่มหลังเติมคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้ความหนืดของของเหลวหนืดมีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ตามผลการศึกษาในครั้งนี่ยังไม่สามารถสรุปรูปแบบความสัมพันธ์ที่ชัดเจนระหว่างขนาดอนุภาคของวัสดุชีวมวล ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ และเวลาบ่มหลังเติมคาร์บอนไดออกไซด์ ที่มีต่อความหนาแน่นความสามารถการดูดซึมน้ำ และน้ำมันพืชของฟองน้ำเซลลูโลสจากฟางข้าวได้ โดยสภาวะที่เหมาะสมต่อการเตรียมฟองน้ำเซลลูโลสด้วยฟางข้าว คือ สภาวะที่ใช้ฟางข้าวขนาดอนุภาคเฉลี่ย 297 μm แขนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10%wt เติมด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาตร 20 ml. และใช้เวลาบ่มหลังเติมคาร์บอนไดออกไซด์ 60 นาที โดยที่สภาวะนี้ฟองน้ำที่เตรียมได้มีค่าความหนาแน่น 0.55 (g/cm^3) มีความสามารถในการดูดซึมน้ำ และน้ำมันพืช เท่ากับ 4.03 และ 1.73 เท่าของน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัย

ของพัชรินทร์ และคณะ (2555) ที่เตรียมฟองน้ำเซลลูโลสจากฟางข้าวผ่านกระบวนการของเหลวหนืด ฟองน้ำเซลลูโลสที่ขึ้นรูปได้พบว่ามีประสิทธิภาพในการดูดซึมน้ำ 3.85 เท่าของน้ำหนักแห้ง และความสามารถในการดูดซึมน้ำมันพืชได้ 0.11 เท่าของน้ำหนักแห้ง ซึ่งค่าที่ได้มีค่ามากกว่าในการวิจัยครั้งนี้ จึงสรุปได้ว่างานวิจัยนี้มีความสามารถพัฒนาการดูดซึมน้ำและน้ำมันพืชของฟองน้ำเซลลูโลสจากฟางข้าวได้เพิ่มขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ศึกษาช่วงปริมาณเซลลูโลสที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ฟองน้ำเซลลูโลสในวัสดุชีวมวลอื่นๆ

5.1.2 ศึกษาความสามารถในการดูดซึมน้ำมันที่ ชนิดอื่นที่ใช้ในการประกอบอาหารหรือน้ำมันเครื่องยนต์ที่อาจถูกปล่อยทิ้ง และอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

5.1.3 ศึกษาสารปรับแต่งคุณภาพฟองน้ำเพื่อให้ฟองน้ำเซลลูโลสมีความสามารถในการเชิงพาณิชย์

เอกสารอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

- กระทรวงพลังงาน. ชีวมวล. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน: กระทรวงพลังงาน, 2560.
- กิตติยาภรณ์ ร่องเมือง และคณะ. “การประเมินการปลดปล่อยมลพิษจากการเผาไหม้ฟางข้าวในที่โล่งแจ้ง”, ประชุมวิชาการวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติระดับชาติ ครั้งที่ 3. น. 34-41. ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2559.
- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนานนท์. “โครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลเซลลูโลส”, cellulose/เซลลูโลส. <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0612/cellulose-เซลลูโลส>. 20 พฤษภาคม, 2560.
- นฤมล ศรีวิฑูรย์. การผลิตฟองน้ำเส้นใยธรรมชาติจากขานอ้อยเพื่อเป็นวัสดุดูดซับน้ำมัน ปนเปื้อนในทะเล. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2548.
- พัชรินทร์ คงดี, ภัทราพงศ์ ตริยรัตน์ภัทรา และนำชัย แก้วสาลี. ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติฟองน้ำเส้นใยจากฟางข้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2555.
- ศศิประภา รัตนดิลก ณ ภูเก็ต. เทคโนโลยีการผลิตสิ่งทอจากใยพืช เล่มที่ 3 เทคโนโลยีการเตรียมเยื่อเซลลูโลส และการปั่นใยเซลลูโลสประดิษฐ์. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2558.
- ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์ และคณะ. “การผลิตฟองน้ำเส้นใยธรรมชาติจากฟางข้าวเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับไขมันในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง”, วารสารวิศวกรรมสาร มก. 19(57): 81-87; ธันวาคม-มีนาคม, 2549.
- สุภาวดี ผลประเสริฐ. “การปรับสภาพวัตถุดิบพอลิโนเซลลูโลสสำหรับการผลิตเอทานอล”. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 22(5): 641-649, 2557.
- สุวรรณมา ละม้ายอิน. “การปรับปรุงกระบวนการผลิตฟองน้ำเซลลูโลสจากฟางข้าวเพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับ”. วารสารไทยวิศวกรรมสาร มก. 23(71): 1-11; กุมภาพันธ์ - เมษายน, 2553.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. “การใช้ประโยชน์ที่ดินทางการเกษตร”, สถิติการเกษตรของประเทศไทย ปี 2558, สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2560.
- สำนักงานสถิติแห่งชาติ. ภาวะการทำงานของประชากร ปี 2560, สำนักงานสถิติแห่งชาติ, 2560.
- ระวีวรรณ แก้วกล้า. การผลิตเอทานอลจากฟางข้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
- วีรศักดิ์ อุดมกิจเดชา. ใยสังเคราะห์เส้นใยอุตสาหกรรมสิ่งทอ. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- Edward, B et al. “Advanced oil sorbents using sequential infiltration synthesis”, J. Mater. Chem. A. 5(28): 2323-2935; July, 2017.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Edward, D. and Chales, A. "Conversion of Old Newspaper and Other Post-consumer Recycled Paper to Regenerated Cellulose", **Journal of solid waste technology and management**, 1997.
- Emanuel, M. et al. "Bionanocomposites from lignocellulosic resources: Properties, applications and future trends for their use in the biomedical field". **Chemical structure of cellulose and hemicellulose**.
https://www.researchgate.net/publication/255482342_Bionanocomposites_from_lignocellulosic_resources_Properties_applications_and_future_trends_for_their_use_in_the_biomedical_field. 26 July 2013.
- Iveson, S.M. and Rutherford, K.F. Biggs SR. "Liquid penetration rate into submerged porous particles : theory, experimental validation and implications for iron ore granulation and sintering", **Mineral Processing and Extractive Metallurgy: Transactions Institute of Mining and Metallurgy: section C**. 110(133): 133-143; July, 2013.
- Masaki, S. and et al. "Development and Water Test of Suki Bark Sorbent (SBS)", **Spill Science & Technology Bolletin**. 8: 475-482, 2013.
- Maria del Pilar Castillo. "Structure of lignin", **Degradation of pesticides by Phanerochaete chrysosporium in solid substrate fermentation**. Department of Microbiology: Swedish University of Agricultural Sciences, 1997.
- Michael W. Davidson, "Plant Cell Wall", **Plant cell wall structure**.
<http://micro.magnet.fsu.edu/cells/plants/cellwall.html>. 7 October 2013.
- Nabraska extention publication. "Water Resource Management Drinking Water", **Activated carbon particle**. <http://extensionpublications.unl.edu/assets/html/g1489/build/g1489.htm>. 29 June, 2017.
- Pan, Q. and at el. "Preparation of Rice Straw Cellulose Xanthate and Study on Its Adsorption Properties of Cadmium(II) from Aqueous Solutions", **Asian journal of chemistry**. 26(2): 562-564; January, 2014.
- William Ryan, C. Radford. **Whitewares production, testing, and quality control**: New York: Published on behalf of the Institute of Ceramics by Pergamon Press, 1987

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	นางสาวชิวานันท์ นามวัง
ประวัติการศึกษา	ประถมศึกษา (พ.ศ.2537 - พ.ศ.2542) โรงเรียนอนุบาลอุบลราชธานี มัธยมศึกษา (พ.ศ.2543 - พ.ศ.2548) โรงเรียนเบ็ญจะมะมหาราช ปริญญาตรี (พ.ศ.2549 - พ.ศ.2554) วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมี) ภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ที่อยู่	287 หมู่ 15 ตำบลแสนสุข อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190